

Untersuchung von Holzwerkstoffen unter Schlagbelastung zur Beurteilung der Werkstoffeignung für den Maschinenbau

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

Genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christoph Müller

geboren am 15.12.1982 in Plauen

Tag der Einreichung 19.06.2015

Tag der Verteidigung 07.10.2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel, Technische Universität Chemnitz
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Technische Universität Dresden

Bibliografische Angaben

Müller, Christoph

Thema

„Untersuchung von Holzwerkstoffen unter Schlagbelastung zur Beurteilung der Werkstoffeignung für den Maschinenbau“

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Chemnitz 2015

190 Seiten, 128 Abbildungen, 47 Tabellen, 100 Literaturstellen

Kurzreferat

In der vorliegenden Arbeit werden Holzwerkstoffe im statischen Biegeversuch und im Schlagbiegeversuch vergleichend geprüft. Ausgewählte Holzwerkstoffe werden thermisch geschädigt, zudem wird eine relevante Kerbgeometrie geprüft. Ziel der Untersuchungen ist die Eignung verschiedenartiger Werkstoffe für den Einsatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen mit Schlagbelastungen zu prüfen.

Hierzu werden zunächst die Grundlagen der instrumentierten Schlagprüfung und der Holzwerkstoffe erarbeitet. Der Stand der Technik wird dargelegt und bereits durchgeführte Studien werden analysiert. Darauf aufbauend wird eine eigene Prüfeinrichtung zur zeitlich hoch aufgelösten Kraft-Beschleunigungs-Messung beim Schlagversuch entwickelt. Diese wird anhand verschiedener Methoden auf ihre Eignung und die Messwerte auf Plausibilität geprüft. Darüber hinaus wird ein statistisches Verfahren zur Überprüfung auf ausreichende Stichprobengröße entwickelt und auf die durchgeführten Messungen angewendet. Anhand der unter statischer und schlagartiger Biegebeanspruchung ermittelten charakteristischen Größen, wird ein Klassenmodell zum Werkstoffvergleich und zur Werkstoffauswahl vorgeschlagen. Dieses umfasst integral die mechanische Leistungsfähigkeit der geprüften Holzwerkstoffe und ist für weitere Holzwerkstoffe anwendbar. Abschließend wird, aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen, ein Konzept für die Bauteilprüfung unter Schlagbelastung für weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen.

Schlagworte

Schlagbelastung, Biegung, Holzwerkstoffe, instrumentierte Prüfung, Werkstoffklassen, Werkstoffauswahl, Stichprobengröße, Konfidenzband, Fördertechnik

Abstract

In the present work wood-based materials are compared under static bending load and impact bending load. Several thermal stress conditions are applied to selected materials, furthermore one relevant notch geometry is tested.

The objective of these tests is to investigate the suitability of distinct wood materials for security-relevant applications with the occurrence of impact loads. For this purpose the basics of instrumented impact testing and wood-based materials are acquired. The state of the technology and a comprehensive analysis of original studies are subsequently presented. On this basis an own impact pendulum was developed to allow force-acceleration measurement with high sample rates. The apparatus is validated by several methods and the achieved signals are tested for plausibility. A general approach of testing for adequate sample size is implemented and applied to the tested samples. Based on the characteristic values of the static bending and impact bending tests a classification model for material selection and comparison is proposed. The classification model is an integral approach for mechanical performance assessment of wood-based materials. In conclusion a method for impact testing of components (in future studies) is introduced.

Keywords

Impact load, bending, wood-based materials, instrumented testing, material classification, material selection, sample size, confidence band, vibration, conveyor engineering

Kurzzeichenverzeichnis

Abkürzungen

Kurzzeichen Erklärung

BSH	Brettschichtholz
CAD	Computer Aided Design
COV	Variationskoeffizienten (Coefficient Of Variaton)
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite Elemente Methode
HB	Harte Faserplatte
HWS	Holzwerkstoff / Holzwerkstoffe
IQR	Interquartile Range
KZ	Kerbzähigkeit
MDF	Mitteldichte Faserplatten
MF	Melamin Formaldehyd
MIUPF	Melamin Isocyanat Harnstoff Phenol Formaldehyd
MUPF	Melamin Harnstoff Phenol Formaldehyd
OSB	Oriented Strand Board
PB	Plattenbelastung
PF	Phenol Formaldehyd
PLY	Plywood (Sperrholz)
PU	Polyurethan
PMDI	Polymeres Diphenylmethandiisocyanat
PVAC	Polyvinylacetat
RH	Relative Humidity (relative Luftfeuchtigkeit)
RF	Resorcin Formaldehyd
SB	Poröse Faserplatten
SB	Scheibenbelastung
SEG	Strukturerhaltungsgrad
SWP	Structural Wood Panel (Massivholzplatte)
UF	Harnstoff Formaldehyd
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
WPC	Wood Polymere Composite

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
a	m/s ²	Beschleunigung (allgemein)
a_s	m/s ²	Beschleunigungssignal am Sensor gemessen
a_{tan}	m/s ²	tangentiale Beschleunigung an der Hammerfinne wirkend
A	m ²	Fläche (allgemein)
A_{CB}	m ²	Fläche des Konfidenzbandes
a_{max}	m/s ²	maximale Beschleunigung
A_{out}	m ²	Flächenanteile der Kontrollkurve außerhalb des Konfidenzbandes
$A_{out,o}$	m ²	Flächenanteile der Kontrollkurve oberhalb des Konfidenzbandes
$A_{out,u}$	m ²	Flächenanteile der Kontrollkurve unterhalb des Konfidenzbandes
A_q	m ²	Querschnittfläche der Probe
$A_{q,r}$	m ²	Restquerschnittfläche der Probe
b	mm	Breite (allgemein)
b_{1-3}	mm	Breiten der Probe in Plattenebene gemessen an den Stellen 1 bis 3
b_k	mm	Kerbreite
b_p	mm	Breite der Probe
b_s	mm	Sägeblattbreite
c_{OSB}	m/s ²	Schallgeschwindigkeit in OSB-03 im Vorversuch
C_0	N	Amplitudenausprägung in der angepassten Funktion freie Pendelschwingungen mit Amplitude kleiner 5 °
$CB_{n,z}$	N	Konfidenzband der Größe der Kurvenschar der n Kraftkurven
$CI_{n,z}$	N	Konfidenzintervale der Kurvenschar der n Kraftkurven
E	N/mm ²	E-Modul (allgemein)
$E_{norm,s}$	N/mm ²	E-Modul bestimmt nach Norm
E_{OSB}	N/mm ²	E-Modul von OSB-03 im Vorversuch
$E_{p,s}$	N/mm ²	E-Modul mit Koordinatenursprung und Proportionalitätsgrenze bestimmt
$E_{p,s5}$	N/mm ²	5 % - Quantil des E-Moduls mit Koordinatenursprung und Proportionalitätsgrenze bestimmt
f	Hz	Frequenz (allgemein)
f_{-3dB}	Hz	-3 dB Grenzfrequenz des Übertragungsbereichs
$f_{max,s}$	N/mm ²	maximale Kraft im statischen Biegeversuch bezogen auf die Querschnittfläche
$f_{max,s5}$	N/mm ²	5 % -Quantil der maximalen Kraft im statischen Biegeversuch bezogen auf die Querschnittfläche

f_n	Hz	Resonanzfrequenz eines Sensors
$f_{p,s}$	N/mm ²	Kraft an der Proportionalitätsgrenze im statischen Biegeversuch bezogen auf die Querschnittfläche
F	N	Kraft (allgemein)
$F_{BS,mean}$	N	Amplitudenwert einer theoretischen Schwingung in der ersten Eigenfrequenz der Probe, abgeleitet aus statischen Versuchen
F_{dyn}	N	Gemessener Kraftverlauf im Schlagversuch
F_{flt}	N	Gefilterter Kraftverlauf im Schlagversuch
F_g	N	Gewichtskraft
$F_{ip,d}$	N	Kraft am Trägheitsmaximum im Schlagversuch
F_j	N	j -te Kurve der Kurvenschar der n Kraftkurven
F_k	N	Kontrollkurve zufällig ausgewählt aus den verbliebenen $k = N - n$ Kraftkurven
F_{max}	N	Maximale auf die Sensoren wirkende Kraft
$F_{max,d}$	N	Ermittelte Bruchkraft im Schlagbiegeversuch
$F_{max,s}$	N	Ermittelte Bruchkraft im statischen Biegeversuch
F_n	N	Kurvenschar von n zufällig ausgewählten Kraftkurven
\bar{F}_n	N	Mittelwertskurve der n Kraftkurven
F_p	N	Kraftverlauf einer theoretischen Schwingung in der ersten Eigenfrequenz der Probe die eine messbare Kraft am Sensor erzeugt
$F_{p,s}$	N	Kraft an der Proportionalitätsgrenze im statischen Biegeversuche
F_r	N	Rücktreibende Kraft
F_{rad}	N	Radiale Kraft am Pendel
F_{sta}	N	gemessener Kraftverlauf im statischen Biegeversuch
F_{tan}	N	Tangentiale Kraft am Pendel
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe (allgemein)
h_{1-3}	mm	Höhe der Probe senkrecht zur Plattenebene
h_k	mm	Kerbtiefe
h_p	mm	Nennstärke der Platte
h_r	mm	Resthöhe im Kerbgrund
i_{ges}	1	Gesamtanzahl der diskreten Zeitpunkte zu denen eine Messwert aufgezeichnet wurde
I	m ⁴	Flächenträgheitsmoment (allgemein)
I_{OSB}	m ⁴	Flächenträgheitsmoment einer Probe aus OSB-03 im Vorversuch
j_k	1	Anzahl der Klassen des Klassenmodells

J	kg·m ²	Trägheitsmoment
J_P	kg·m ²	Trägheitsmoment des Pendels
k	1	Anzahl der $N - n$ Kurven
kc_i	1	charakteristische Klasseneigenschaften
$kc_{i,h}$	1	Obergrenzen des Bereichs in dem die charakteristische Klasseneigenschaften liegen
$kc_{i,j}$	1	Grenzwert der j -ten Klasse in der i -ten Eigenschaft
$kc_{i,l}$	1	Untergrenzen des Bereichs in dem die charakteristische Klasseneigenschaften liegen
k_d	N/s	Driftkonstante der Kraftsensoren gemessen
k_{off}	N	Offsetkonstante der der Kraftsensoren gemessen
$K_{N,n}$	1	Anzahl von möglichen Kombinationen aus N mit Zurücklegen und ohne Beachtung der Reihenfolge gezogener n Kurven
l	mm	Länge (allgemein)
l_b	mm	Bruchlänge
l_p	mm	Probenlänge
l_w	mm	Widerlagerabstand
L	kg·m ² ·s ⁻¹	Drehimpuls (allgemein)
L_P	kg·m ² ·s ⁻¹	Drehimpuls des Pendels
L_{P0}	kg·m ² ·s ⁻¹	Anfangsdrehimpuls des Pendels im Auftreffpunkt
m	kg	Masse (allgemein)
m_f	kg	Masse der Hammerfinne
m_p	kg	Masse des Probekörpers
$m_{p,darr}$	kg	Masse des darrgetrockneten Probekörpers
$m_{p,k}$	kg	Masse der Probe im jeweiligen Klima
n	1	Anzahl der aus N zufällig ausgewählten Kurven
n_{fg}	1	Anzahl der Freiheitsgrade eines Modells
n_{it}	1	Anzahl der Bootstrap-Iterationen
n_{max}	1	größtmögliche Anzahl zufällig aus N zu ziehender n Kurven
N	1	Stichprobengröße
$P_{n,z}$	1	Verhältnis zwischen Fläche des Konfidenzbandes und dem Anteil der Fläche der Kontrollkurve außerhalb des Konfidenzbandes
r	mm	Radius
r_k	mm	Kerbradius

r_m	mm	Abstand zwischen Drehachse und Probenmitte
r_t	mm	theoretischer Radius eines mathematischen Pendels gleicher Masse, das in seiner Periodendauer dem realen Pendel entspricht
R^2	1	Bestimmtheitsmaß (in der Arbeit ist stets das korrigierte Bestimmtheitsmaß angegeben)
R_m	N/mm ²	Bruchfestigkeit
RS	N	Summe der Residuen
SD_n	N	Standardabweichungen der Kurvenschar der n Kraftkurven
t	s	Zeit (allgemein)
t_i	s	beliebiger Zeitpunkt innerhalb einer Messkurve
t_v	s	Zeitpunkte zu denen die Kontrollkurve oberhalb des Konfidenzbandes liegt
t_w	s	Zeitpunkte zu denen die Kontrollkurve unterhalb des Konfidenzbandes liegt
T	s	Zeitdauer (allgemein)
TC	s	Zeitkonstante (Time Constant)
T_{exp}	s	Expositionsdauer
T_p	s	Periodendauer
T_w	Tage	Zeitfenster
u	mm	Durchbiegung (allgemein)
u_0	mm	Anfangsdurchbiegung, Konstante der numerischen Integration
u_b	%	Feuchtegehalt des Bauteils in Masseprozent
$u_{BS,max}$	mm	Maximale Durchbiegung in Probenmitte infolge einer theoretischen Schwingung in der ersten Eigenfrequenz der Probe
u_d	mm	Durchbiegungsverlauf im dynamischen (Schlagversuch) ermittelt aus dem Impulserhaltungssatz
$u_{d,a}$	mm	Durchbiegungsverlauf im dynamischen (Schlagversuch) ermittelt aus dem gemessenen Beschleunigungssignal
$u_{ip,d}$	mm	Durchbiegung am Trägheitsmaximum im Schlagversuch
u_k	%	Feuchtegehalt der Charge im jeweiligen Klimat
$u_{max,d}$	mm	Durchbiegung bei Kraftmaximum im Schlagbiegeversuch
$u_{max,s}$	mm	Durchbiegung bei Kraftmaximum im statischen Biegeversuch
u_p	mm	Theoretische Durchbiegung in der Probenmitte infolge einer theoretischen Schwingung in der ersten Eigenfrequenz der Probe
u_p	%	Feuchtegehalt der Probekörper in Masseprozent
$u_{p,k}$	%	Feuchtegehalt der Probekörper nach der jeweiligen Klimatisierung in Masseprozent
$u_{p,s}$	mm	Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze im statischen Biegeversuch
u_s	mm	Durchbiegungsverlauf im statischen Biegeversuch

v_0	m/s	Auftreffgeschwindigkeit des Pendels auf der Probe, Konstante der numerischen Integration
$v_{d,a}$	m/s	Geschwindigkeit des Pendels an der Hammerfinnenmitte, berechnet durch numerische Integration des Beschleunigungssignals
V_p	mm ³	Volumen der Probe im jeweiligen Klima
$w_{b,d}$	kJ/m ²	Brucharbeit im Schlagbiegeversuch bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{b,d5}$	kJ/m ²	5 % - Quantil der Brucharbeit im Schlagbiegeversuch bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{b,s}$	kJ/m ²	Brucharbeit im statischen Biegeversuch bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{b,s5}$	kJ/m ²	5 % - Quantil der Brucharbeit im statischen Biegeversuch bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{ip,d}$	kJ/m ²	Arbeit im Bereich des Trägheitsmaxiums des Schlagbiegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{lib,s}$	kJ/m ²	Arbeit im linearen Bereich des statischen Biegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{nlib,s}$	kJ/m ²	Arbeit im nichtlinearen Bereich des statischen Biegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{pr,d}$	kJ/m ²	Arbeit im Bereich prior to rupture des Schlagbiegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{rb,d}$	kJ/m ²	Arbeit im Restbruchbereich des Schlagbiegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$w_{rbb,s}$	kJ/m ²	Arbeit im Restbruchbereich des statischen Biegeversuchs bezogen auf den Probenquerschnitt
$W_{B,a}$	J	Brucharbeit, kumuliert aus dem Kraftsignal und dem durch Doppelintegration des Beschleunigungssignals berechneten Wegsignal
$W_{B,d}$	J	Brucharbeit, kumuliert aus dem Kraftsignal und dem mittels Impulserhaltungssatz aus dem Kraftsignal berechneten Wegsignal
$W_{ip,d}$	J	Arbeit im Bereich des Trägheitsmaxiums des Schlagbiegeversuchs
$W_{lib,s}$	J	Arbeit im linearen Bereich des statischen Biegeversuchs
W_{nenn}	J	Nennarbeitsvorrat des Schlagpendels in J
$W_{nlib,s}$	J	Arbeit im nichtlinearen Bereich des statischen Biegeversuchs
$W_{pr,d}$	J	Arbeit im Bereich prior to rupture des Schlagbiegeversuchs
$W_{rb,d}$	J	Arbeit im Restbruchbereich des Schlagbiegeversuchs
$W_{rbb,s}$	J	Arbeit im Restbruchbereich des statischen Biegeversuchs
z	1	Vielfaches der Standardabweichung einer Normalverteilung

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
γ	-/g/cm ³	spezifische mechanische Größe
γ_ρ	-/g/cm ³	spezifische mechanische Größe, dichtenormiert
ΔE_{rot}	J	Änderung der Rotationsenergie des Pendels
Δh	mm	Fallhöhe des Pendels
ΔL_i	kg·m ² ·s ⁻¹	diskrete Impulsänderung infolge des Bruchvorganges
Δt	s	diskreter Abstand zwischen zwei Zeitpunkten
Δt_i	s	diskrete Abstände zwischen den Zeitpunkten t_i der Messung (konstant)
Δt_v	s	diskrete Abstände zwischen den Zeitpunkten t_v der Messung (konstant)
Δt_w	s	diskrete Abstände zwischen den Zeitpunkten t_w der Messung (konstant)
ε	1	Dehnung (allgemein)
ε_{max}	1	maximale Randfaserdehnung
ϑ	°C	Temperatur (allgemein)
ϑ_B	°C	Temperatur des Bauteils
$\vartheta_{E,W}$	°C	Extremwert der Temperatur bei Zeitfenster W
$\vartheta_{EI-3,W}$	°C	charakteristische Extrema 1 bis 3 der Temperatur bei Zeitfenster W
ϑ_U	°C	Temperatur der Umgebung
$\kappa_{B,d}$	mm/mm	Bruchlänge bezogen auf den Widerlagerabstand im Schlagbiegeversuch
$\kappa_{B,s}$	mm/mm	Bruchlänge bezogen auf den Widerlagerabstand im statischen Biegeversuch
λ	1	Schlankheitsgrad (allgemein)
λ_i^2	1	i -ter Eigenwert der i -ten Eigenform
λ_p	1	Schlankheitsgrad der Probe
λ_w	1	Schlankheitsgrad / Probenlänge bezogen auf den Widerlagerabstand Mitte Mitte
μ	[μ]	Mittelwert einer Standardnormalverteilung
ρ	g/cm ³	Dichte (allgemein)
ρ_k	g/cm ³	Dichte der Charge im jeweiligen Klima

ρ_{OSB}	g/cm ³	Dichte von OSB-03 im Vorversuch
$\rho_{p,k}$	g/cm ³	Dichte der Probe im jeweiligen Klima
σ	N/mm ²	Spannung (allgemein)
σ	[μ]	Standardabweichung einer Standardnormalverteilung
σ_{max}	N/mm ²	maximale Randfaserspannung
$v_{ip,d}$	mm/mm	Durchbiegung bei Maximalkraft bei statischer Messung, bezogen auf die Probenlänge
$v_{max,d}$	mm/mm	Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze, bezogen auf die Probenlänge
$v_{max,s}$	mm/mm	maximale Durchbiegung im statischen Biegeversuch bezogen auf die Probenlänge
$v_{p,s}$	mm/mm	Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze im statischen Biegeversuch bezogen auf die Probenlänge
v_s	mm/mm	Durchbiegung im statischen Biegeversuch bezogen auf die Probenlänge
φ	rad	Winkelauslenkung des Pendels
φ_0	rad	Anfangsauslenkung
φ_0	rad/s ²	Winkelbeschleunigung
$\varphi_{E,W}$	%	Extremwert der relativ Luftfeuchtigkeit bei Zeitfenster W
$\varphi_{E1-3,W}$	%	charakteristische Extrema der relativ Luftfeuchtigkeit bei Zeitfenster W
φ_U	%	relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit (allgemein)
ω_i	Hz	i -te Eigenkreisfrequenz

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	19
1.1 Holzwerkstoffe - technische Nutzung gestern und heute.....	19
1.2 Bedeutung der Schlagzähigkeit für Maschinenbauteile.....	21
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit.....	22
2 Grundlagen	25
2.1 Konstruktionswerkstoffe.....	25
2.2 Übersicht Holznutzung und Holzwerkstoffe.....	27
2.3 Holzwerkstoffe - holzanatomische und technologische Eigenschaften.....	29
2.3.1 Anatomie des Holzes, Anisotropie und Inhomogenität der Eigenschaften.....	29
2.3.2 Klebstoffe	32
2.3.3 Klimatisierungsprozess.....	33
2.4 Holzwerkstoffe - mechanische Eigenschaften	35
2.4.1 Statisch mechanische Eigenschaften.....	35
2.4.2 Dynamisch mechanische Eigenschaften.....	36
2.4.3 Abgrenzung zwischen Bruch- und Schlagzähigkeit.....	38
2.5 Bedeutung der Schlagversuche bei verschiedenen Werkstoffgruppen.....	39
2.6 Normative Grundlagen.....	41
2.6.1 Klassen der Holzwerkstoffe.....	41
2.6.2 Versuchseinrichtungen und Methoden der Schlagprüfung.....	42
2.7 Versuchstechnik zur Schlagprüfung.....	43
2.7.1 Entwicklung der Schlagprüfung an Holz und Holzwerkstoffen.....	43
2.7.2 Instrumentierung der Schlagprüfung.....	46
2.8 Einflussfaktoren auf die Schlagzähigkeit.....	48
2.8.1 Dichte, Feuchtigkeit und Temperatur.....	48
2.8.2 Thermische Schädigung von Holz und Holzwerkstoffen.....	52
2.8.3 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit.....	54
2.8.4 Aspektverhältnisse und Probengröße.....	55
2.8.5 Kerbwirkung.....	56
2.8.6 Optisches Erscheinungsbild der Bruchflächen	58
2.9 Stand der Technik und Konkretisierung der Aufgabenstellung.....	59
3 Einflussparameter, Material und Methoden.....	63
3.1 Klimatische Einflussparameter.....	63
3.1.1 Klimaschwankungen in Produktionsstätten.....	63

3.1.2 Thermische Schädigung.....	67
3.2 Versuchsmaterial.....	69
3.2.1 Werkstoffauswahl.....	69
3.2.2 Probenabmessungen.....	73
3.2.3 Konstruktive Kerben.....	74
3.3 Verfahren zur Klimatisierung, Feuchte- und Dichtebestimmung	76
3.4 Bewertung der Bruchfläche.....	77
3.5 Statische Biegeversuche.....	78
3.6 Aufbau und Wirkungsweise der Versuchseinrichtung zur Schlagprüfung.....	80
3.6.1 Mechanischer Aufbau.....	80
3.6.2 Verwendete Messtechnik / Instrumentierung.....	82
3.6.3 Physikalische Beschreibung des Pendels.....	85
3.6.4 Zeitliche Beschreibung des Bruchverlaufs.....	89
3.6.5 Plausibilitätsprüfung der Messwerte.....	91
3.6.6 Vorversuche zur Beurteilung des Messsystems.....	94
3.6.7 Schwingungsanalyse.....	96
3.7 Versuchsplanung	101
3.8 Prüfung auf ausreichende Stichprobengröße.....	103
3.9 Verwendete analytische und statistische Methoden.....	108
4 Experimentelle Untersuchungen.....	111
4.1 Einführung und Überblick.....	111
4.2 Versuchsdurchführung und Angaben zur Probenkonditionierung.....	111
4.2.1 Querschnittmessreihe	111
4.2.2 Längsschnittmessreihe.....	114
4.3 Algorithmen zur Ermittlung der Kennwerte	116
4.3.1 Kennwerte des statischen Biegeversuchs.....	116
4.3.2 Kennwerte des Schlagversuchs.....	120
4.4 Ergebnisse der Querschnittmessreihe.....	126
4.4.1 Charakteristische Werte des statischen Biegeversuchs.....	126
4.4.2 Charakteristische Werte aus dem Schlagversuch.....	132
4.4.3 Vergleich von statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch.....	136
4.4.4 E-Modul der Werkstoffe und Dichteabhängigkeit der Eigenschaften.....	139
4.5 Ergebnisse der Längsschnittmessreihe	144
4.5.1 Trockene Proben mit Reklimateisierung.....	144
4.5.2 Trockene Proben ohne Reklimateisierung.....	146
4.5.3 Kerbwirkung im Normklima.....	148

4.6 Bewertung der Stichprobengröße	151
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Quer- und Längsschnitt.....	153
4.8 Entwicklung eines Systems von Fähigkeitsklassen	154
4.8.1 Anforderungen.....	154
4.8.2 Vorschlag für ein System von Fähigkeitsklassen.....	155
4.8.3 Klassenmodell angewendet auf die Querschnittmessreihe.....	158
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	161
5.1 Zusammenfassung	161
5.1.1 Durchgeführte Arbeiten	161
5.1.2 Kritische Würdigung.....	162
5.2 Ausblick.....	163
5.2.1 Vorschlag für ein Prüfkonzept zur Schlagprüfung an Bauteilen.....	163
5.2.2 Weiterführende Arbeiten.....	167
6 Literaturverzeichnis.....	169
Anlagenverzeichnis.....	179

Anmerkungen zur Arbeit

Formeln die Allgemeinwissen im Ingenieursberuf und / oder in Formelsammlungen, Tafelwerken u.ä. dargelegt sind, werden in dieser Arbeit ohne Quellenangabe geführt. Zitationen wörtlicher Art sind generell in Anführungszeichen und in kursiver Schrift gesetzt. Sinngemäße Zitationen einzelner Sätze werden mit der Quellenangabe vor dem Satzendezeichen gekennzeichnet. Steht die Quellenangabe nach dem Punkt bezieht sich das Zitat auf den gesamten vorangegangenen Absatz. Quellen werden mit Tabellen-, Abbildungs- und Seitennummer angegeben, insofern sie einem Buch oder ähnlich umfangreichen Werk entstammen. Quellen aus Fachartikeln oder Normen werden ohne Seitenangabe, jedoch mit Abbildungs- oder Tabellennummer angegeben. Verweise innerhalb der Arbeit werden dann mit Seitenzahl angegeben, wenn sich der Bezug nicht im gleichen Kapitel findet. Wird ein Verweis auf eine Seite, Abbildung oder Tabelle direkt nach einer Quellenangabe genannt, bezieht sich dieser auf das Originaldokument. In das Kurzzeichenverzeichnis finden nur Abkürzungen und Formelzeichen Eingang, die vom Autor selbst vergeben werden, Kurzzeichen aus Zitaten werden nicht erwähnt.

1 Einführung

1.1 Holzwerkstoffe - technische Nutzung gestern und heute

Holz als Werkstoff, sowohl in natürlicher wie auch in veredelter Form, kommt seit Anbeginn der anthropogenen Werkzeugnutzung eine bedeutende Stellung zu. Aufgrund der Verteilung der Waldvorkommen war und ist eine flächendeckende Rohstoffversorgung in weiten Teilen der Welt, von den tropischen bis zu den kalten Klimazonen, gewährleistet. Hinzukommt eine vergleichsweise einfache Bearbeitbarkeit durch abtragende Verfahren. Gleichzeitig entsprechen die Eigenschaftsprofile der Hölzer auch einer ganzen Reihe von Anforderungen an die aus ihnen gefertigten Gegenstände. So sind mechanische, optische und haptische Eigenschaften im Vergleich zu vielen anderen Werkstoffen als positiv zu beurteilen. „*Wood in its unmodified form is unique amongst commercially important engineering materials It is extremely mechanically efficient compared to most other materials,*“ [Smith, Landis & Gong 2003], S. 1.

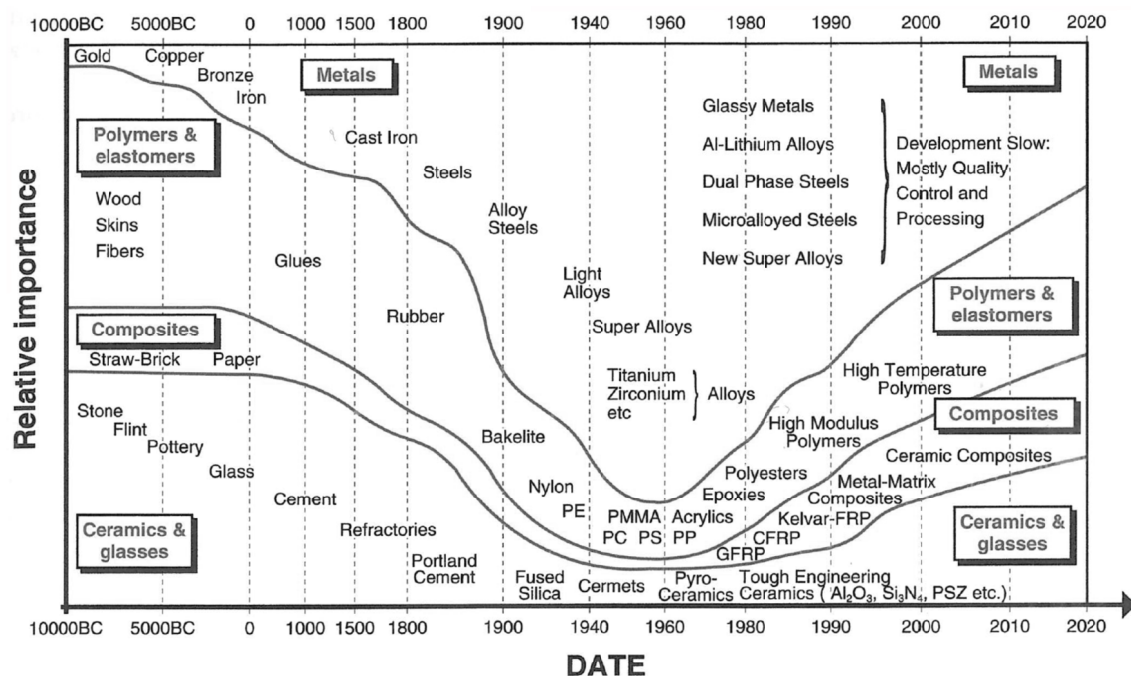


Abbildung 1.1: „The evolution of engineering materials with time. "Relative importance" is based on information contained in the books listed under "Further reading", plus, from 1960 onwards, data for the teaching hours allocated to each material family in UK and US Universities. The projections to 2020 rely on estimates of material usage in automobiles and aircraft by manufacturers. The time scale is non-linear. The rate of change is far faster today than at any previous time in history.“ [Ashby 2007], Abbildung 1.1, S. 5

Auch für das Ingenieurwesen von den frühesten städtischen Strukturen über die Antike, das Mittelalter¹ bis zur Zeit der Industrialisierung ist der Werkstoff Holz von zentraler Bedeutung. Heute haben Holz und Holzwerkstoffe nach wie vor ihren festen Platz im Hochbau und werden hier auch nicht in Frage gestellt. Anders verhält es sich in technischen Bereichen wie dem Ma-

¹ Für die frühen Zeitabschnitte ist der Begriff „Ingenieurwesen“ anachronistisch, erscheint aber in der Retrospektive als treffender als z. B. „Bauwesen“, denn längst nicht alle Anwendungsfälle der Vergangenheit bezogen sich einzig auf das Schaffen von Wohnraum. Vielmehr entstanden auch zahlreiche technische Einrichtungen als Konstruktionen mit Holzwerkstoffen.

schinenbau. Durch die zunehmende Entwicklung von Surrogaten und künstlich hergestellten Werkstoffen seit der Mitte des 20. Jahrhunderts sowie die breite Verfügbarkeit der metallischen Werkstoffe seit Beginn des 19. Jahrhunderts, wurde das Holz hier weitgehend verdrängt (vgl. Abbildung 1.1).



Abbildung 1.2: Skidförderer aus Birkensperrholz der Volkswagen AG im Werk Wolfsburg [Volkswagen 2014a]

Im Zuge des stärker werdenden gesellschaftlichen Bewusstseins für die Schonung von Ressourcen gelangen die Holzwerkstoffe aber auch im technischen Bereich, in dem sie über Jahrzehnte kaum von Bedeutung waren, wieder verstärkt in den Fokus der Planer und Entwickler. Eine ganze Reihe innovativer Produkte, von der Produktionstechnik (vgl. Abbildung 1.2) bis hin zum Lifestyleobjekt (vgl. Abbildung 1.3), wurden in den letzten Jahren auf Basis von Holzwerkstoffen entwickelt. Selbst eine Renaissance der Werkstoffe in der Automobilbranche scheint in einigen Fällen nicht ausgeschlossen. Diese Entwicklungen zeigen den Trend wieder verstärkt mit nachwachsenden Rohstoffen als Werkstoffgrundlage zu arbeiten und zu planen. Eine wesentliche Aufgabe ist folglich die Bereitstellung von Methoden, Verfahren und Kennwerten, um das Holz als Werkstoff beschreibbar und somit beherrschbar zu machen.



Abbildung 1.3: Handelsüblicher Rennradrahmen aus Holz, von Hand laminiert [Renovo 2015]

1.2 Bedeutung der Schlagzähigkeit für Maschinenbauteile

„Die Schlagzähigkeit ist der Widerstand gegenüber einer schlagartigen Belastung mittels Pendelschlagwerk. Sie wird bei Holzwerkstoffen wenig geprüft.“ [Dunky & Niemz 2002], S. 86. Der Widerstand gegen sprödes Brechen infolge einer schlagartigen Belastung ist ein Maß für die Zähigkeit eines Werkstoffes. Dieser Widerstand ist abhängig von einer ganzen Reihe von Faktoren und hat Einfluss auf die Anwendungsgrenzen des Werkstoffes. Für den Konstrukteur ist die Kenntnis dieser Eigenschaft zur Planung und Umsetzung sicherer Anlagen unerlässlich. Wesentliche Bedeutung besitzt die Kenntnis über die Widerstandsfähigkeit gegen schlagartige Belastungen bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter Bauteile. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass überall dort hochdynamische / schlagartige Belastungen entstehen, wo sich Bewegungsvorgänge ungeplant / ungewollt ändern. Zur Veranschaulichung sind im Folgenden einige Szenarien skizziert, die durch beliebige weitere Einsatzfälle ergänzt werden können. Bei fördertechnischen Anlagen besteht häufig die Notwendigkeit zu redundanten Lagesicherungssystemen. Fällt ein elektronischer Endlagenschalter aus, muss ein mechanischer Anschlag die Lagesicherung der bewegten Einheit sicherstellen. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass es zu einer schlagartigen Belastungen auf den mechanischen Anschlag kommt. Versagt dieser infolge der Belastung kommt es zu einem Schaden. Ein Weiteres sicherheitsrelevantes Problem ist die Absicherung von vertikalen Förderanlagen gegen das Versagen des Tragmittels. Ein Versagen des Tragmittels (Seile, Ketten, Gurte) führt zum Absturz des Lastaufnahmemittels. Um den Absturz zu verhindern werden Rastsperrn / Bremsen eingesetzt, deren Lastabtragung im Einsatzfall ebenso schlagartig belastet wird. Möglich ist ebenso ein Versagen auf Steuerungsebene ohne mechanische Ursachen. Auch für diesen Fall sind Sicherungseinrichtungen vorzusehen, die das Lastaufnahmemittel in einer entsprechenden Lage sichern. Hier kann von schlagartigen Belastungen ausgegangen werden. An den genannten Szenarien zeigt sich die Bedeutung der Untersuchung von Werkstoffen bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Unter dem Aspekt betrachtet, dass die Dimensionierung der tragenden Strukturen dieser fördertechnischen Einrichtungen hauptsächlich für statische Lastfälle stattfindet^{2,3}, wird klar, wie wichtig die Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Werkstoffe ist. Besonders wenn zukünftig in diesem Technologiebereich neue Konstruktionswerkstoffe eingesetzt werden sollen. Eine Klassifizierung der handelsüblichen Holzwerkstoffe unter diesen Gesichtspunkten findet nicht statt.

² Es ist bekannt, dass Kennwerte aus Schlagbiegeversuchen nicht für die Dimensionierung von Bauteilen herangezogen werden dürfen (vgl. [DIN EN ISO 179-2]). Sie lassen aber einen Vergleich und eine Beurteilung von Werkstoffen zu und dienen so der Materialauswahl.

³ Die Dimensionierung von tragenden Strukturen in fördertechnischen Einrichtungen, häufig Stahl-Schweiß-Gestelle oder auch Aluminiumprofil-Schraub-Gestelle, erfolgt in aller Regel nach statischen Lastfällen auf Basis der Erfahrung des Konstrukteurs. Um Sicherheit auch bei unvorhergesehenen (dynamischen) Belastungen zu gewährleisten, wird häufig ein Faktor größer 1 auf die erwartete statische Maximalbelastung aufgeschlagen.

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist eine Auswahl handelsüblicher Holzwerkstoffe in Bezug auf deren Eignung für Maschinenbauteile zu prüfen, die schlagartigen Belastungen unterliegen. Anhand der in der Arbeit entwickelten Methoden, soll eine Charakterisierung der Holzwerkstoffe möglich werden, um diese gezielt bestimmten **Fähigkeitsklassen**⁴ zu zuordnen. Anhand dieser Klassen wird die Werkstoffauswahl erleichtert. Es gilt ein **Modell zur Klassenbildung** abzuleiten, dessen Eingangsgrößen die **charakteristischen Größen**⁵ des **Schlagbiegeversuchs** sind (vgl. Abbildung 1.4). Zur Ermittlung der charakteristischen Größen ist es notwendig, ein geeignetes **instrumentiertes Messverfahren** zu entwickeln, welches, neben der Ermittlung energetischer (also kumulierter) Größen des Schlagbiegeversuchs, auch die Ermittlung örtlich und zeitlich hoch aufgelöster Kraft-Weg-Kurven, erlaubt. In der Umsetzung dieses Messverfahrens besteht ein wesentlicher Teil der Arbeit. Ein weiterer Teil der Arbeit ist die methodische Ermittlung von **Art und Ausprägung der Einflussparameter** auf das Werkstoffverhalten, wie sie im industriellen Umfeld zu erwarten sind. Dies können neben klimatisch variierenden Bedingungen auch Vorschädigung oder konstruktive Kerben sein. Die Variation der charakteristischen Größen infolge der Einflussparameter wird anhand von Versuchen mit der entwickelten Versuchseinrichtung analysiert. Weiterhin wird ein **Vergleich zwischen** dem Werkstoffverhalten unter **schlagartigen** und dem unter **quasi-statischen Belastungen** vorgenommen. Lässt sich anhand einer beschreibbaren Relation von den charakteristischen Werten die aus den quasi-statischen Versuchen ermittelt wurden, auf die aus den Schlagversuchen ermittelten schließen, dann können zukünftig Schlagversuche eingespart werden.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an üblichen Standards und entspricht so nicht immer der Chronologie der durchgeführten Arbeiten. In **Kapitel 2** werden die Grundlagen für Schlagversuche an Holzwerkstoffen gelegt. Dazu werden, im Rahmen des zum Verständnis Notwendigen, holzanatomische, technologische sowie mechanischen Eigenschaften dargestellt. Weiterhin wird ein vergleichender Überblick über Schlagversuche bei verschiedenen Werkstoffgruppen gegeben sowie die normativen Grundlagen zusammengefasst. Technische Standards sowie das Exzerpt und die Zusammenfassung betreffender wissenschaftlicher Studien schließen sich an. Am Ende des Kapitels wird die Aufgabenstellung anhand der gefundenen Grundlagen strukturiert und präzisiert. **Kapitel 3** umfasst die Versuchsplanung, also die Methoden nach denen die Bedingungen der industriellen Umgebung ermittelt und für die Versuche modellhaft nachgestellt werden (vgl. Abbildung 1.4). Hierzu zählen neben konstruktiven Kerben verschiedene Klimaregime bis hin zur Darrtrocknung der Probekörper. Weiterhin wird die Auswahl und Bereitstellung des Probenmaterials dargestellt. Es schließen sich die Beschreibungen der Verfahren zur Klimatisierung, Feuchte- und Dichtebestimmung sowie der Bewertung der Bruchfläche an. Es wird eine Übersicht über die durchzuführenden Versuche gegeben und die Durchführung der sta-

4 Gemeint ist die Fähigkeit als mechanische Leistungsfähigkeit

5 Als charakteristische Größen werden in dieser Arbeit Quantile von Kennwertverteilungen bezeichnet z. B. 5 % - Quantil oder 50 % - Quantil (Median).

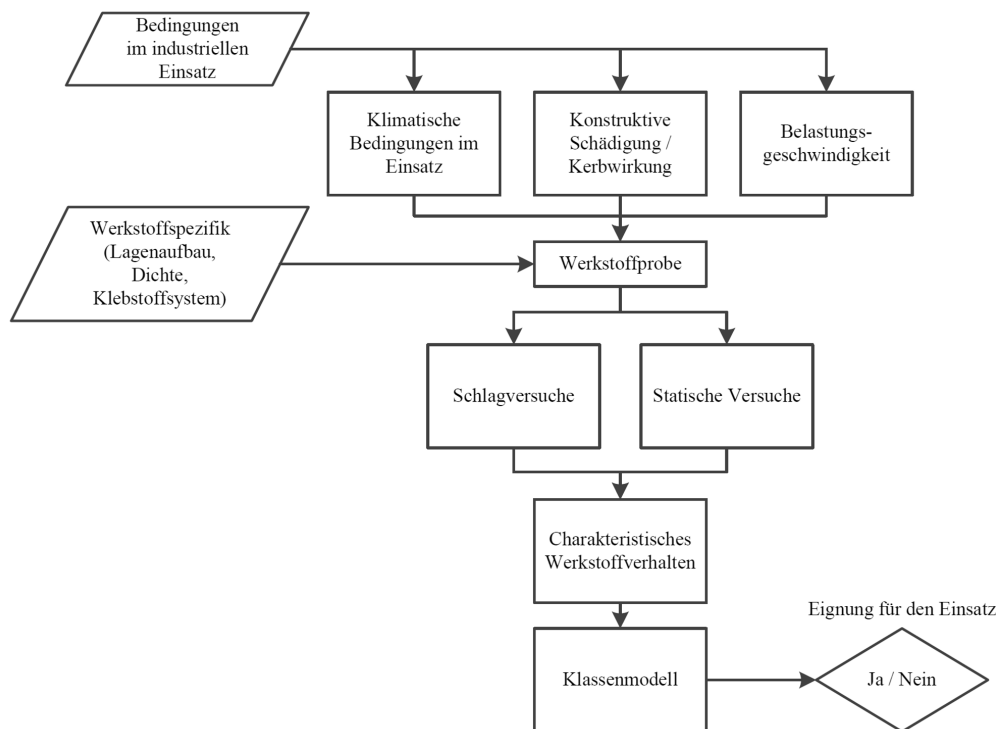


Abbildung 1.4: Struktur der Einflussgrößen auf das charakteristische Werkstoffverhalten

tischen und schlagartigen Biegeversuche beschrieben. Dabei liegt ein wesentlicher Fokus auf der Beschreibung des Messsystems für die Schlagversuche. Es folgt die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Stichprobengröße. Die in der späteren Datenanalyse verwendeten mathematisch analytischen und statistischen Methoden schließen das Kapitel ab. **Kapitel 4** zeigt die Versuchsdurchführung und erläutert zunächst die charakteristischen Werte, die in der Datenanalyse bestimmt werden. Die Ergebnisse aus statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch im Normklima werden dargestellt. Es schließt sich der Vergleich beider Versuchsarten an. Die Ergebnismengen der Versuche an klimatisch abweichend konditionierten und gekerbten Proben werden analysiert und Interpretationen der Effekte abgeleitet. Aufbauend auf den berechneten charakteristischen Größen wird ein Klassenmodell gebildet und auf die in der Arbeit untersuchten Holzwerkstoffe angewendet. **Kapitel 5** schließt mit einer Zusammenfassung der geleisteten Arbeiten und einem Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsthemen die Arbeit inhaltlich ab.

2 Grundlagen

2.1 Konstruktionswerkstoffe

Konstruktionswerkstoffe im Allgemeinen bezeichnen die Vielfalt an erschlossenen Stoffen, die zur Erstellung von Bauteilen und Baugruppen verschiedenster Funktion nutzbar sind. Die Funktionsstruktur eines Konstruktionselementes stellt gleichermaßen verschiedenste Anforderungsprofile an den Werkstoff⁶ aus dem das Element (die Funktionsstruktur) hergestellt ist. Umfassend betrachtet beschränkt sich diese Funktionsstruktur nicht auf die Erfüllung technischer Funktionen (z. B. Last abtragen, Führen, Stützen, Bewegung zulassen etc.). Zusätzlich ist eine ganze Reihe sich anschließender Randbedingungen zu erfüllen, die sich aus wirtschaftlichen, ökologischen, technologischen oder politischen Anforderungen ergeben. So ist es die Vielschichtigkeit dieser Anforderungen, die die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes für eine Funktionsstruktur zu einem komplexen Prozess macht. Gleichzeitig wurde über die Jahre ein großer Pool an Konstruktionswerkstoffen entwickelt. Eine allgemein übliche Konvention ist die Einteilung der Werkstoffgruppen nach ihrer molekular-strukturellen Zusammensetzung (vgl. Abbildung 2.1).

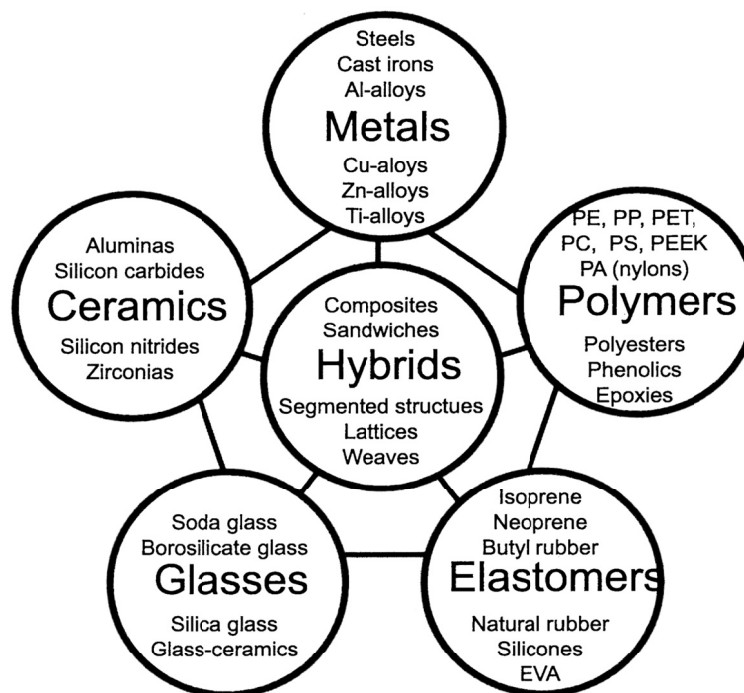


Abbildung 2.1: „The menu of engineering materials. The basic families of metals, ceramics, glasses, polymers and elastomers can be combined in various geometries to create hybrids.“ [Ashby 2007], Abbildung 3.1, S. 29

Die Auswahl des Werkstoffes für eine Funktionsstruktur obliegt in der Regel dem Konstrukteur. Dieser lässt sich bei einfachen Bauteilen von der Erfahrung leiten. Zu den klassischen

⁶ Als Werkstoff kann ein Stoff bezeichnet werden, der zum einen verfügbar ist und dessen Eigenschaften zum anderen in soweit bekannt sind, dass er für die Produktion von Waren nutzbar ist oder nutzbar gemacht werden kann.

im Maschinenbau vertretenen Werkstoffen sind die Metalle und die Kunststoffe zu zählen. Spezielle Anforderungen machen aber auch häufig den Einsatz von Werkstoffen anderer Gruppen notwendig. Eine besondere Bedeutung kommt im Hochtechnologiebereich Verbundwerkstoffen zu. Biogene Werkstoffe (wie Holzwerkstoffe) hingegen verfügen über eine äußerst eingeschränkte Verbreitung im klassischen Maschinenbau (vgl. [Eichhorn 2013], S. 9 und [Eckardt 2013], S. 19). In den letzten Jahren sind neue Paradigmen wie Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung mitentscheidend für die Werkstoffauswahl geworden. Dies äußert sich auch im zunehmenden Einsatz biogener Werkstoffe in Bereichen der Technik, in denen diese früher keine Anwendung fanden oder aus dieser verdrängt worden sind. Ein Beispiel hierfür ist der Automobil- / Nutzfahrzeugbau, in dem das Holz als Werkstoff bis zum Ende der 50er Jahre eine wesentliche Rolle spielte (vgl. Abbildung 2.2), dann aber nahezu restlos verdrängt wurde. Heute werden erneut Forschungsarbeiten vorangetrieben, die zum Ziel haben das Holz in Multimaterialsystemen wieder in den Automobilbau zu bringen (vgl. [Witte 2012] oder [Kohl 2014]). Auch in anderen Technikgebieten leben Holzwerkstoffe, als vorteilhafte Ersatzstoffe für metallische oder polymere Werkstoffe, wieder auf. Um diese Entwicklung verantwortungsvoll weiter voranzutreiben, bedarf es aber weiterhin dem Abbauen von Ressentiments durch das bereitstellen technisch-wissenschaftlicher Dimensionierungs- und Auswahlkriterien.



Abbildung 2.2: Fahrerhaus eines Horch H3 in Holz-Misch-Bauweise - Rekonstruktion Nutzfahrzeugmuseum Hartmannsdorf (Foto privat)

2.2 Übersicht Holznutzung und Holzwerkstoffe

In der vorliegenden Arbeit werden das Holz und dessen makrostrukturell abkommende Werkstoffe als Konstruktionswerkstoffe im eigentlichen Sinn angesehen. Insofern entfallen alle Betrachtungen zur Holznutzung, bei der Werkstoffe auf chemischen Weg (Lignin, Zellulose) oder auf granularem Weg mit einem Teil an Polymermatrix (Wood Plastics Composites - WPCs) synthetisiert werden. Wenngleich diese für andere Technologiebereiche durchaus zukunftssträftig und adäquat erscheinen.

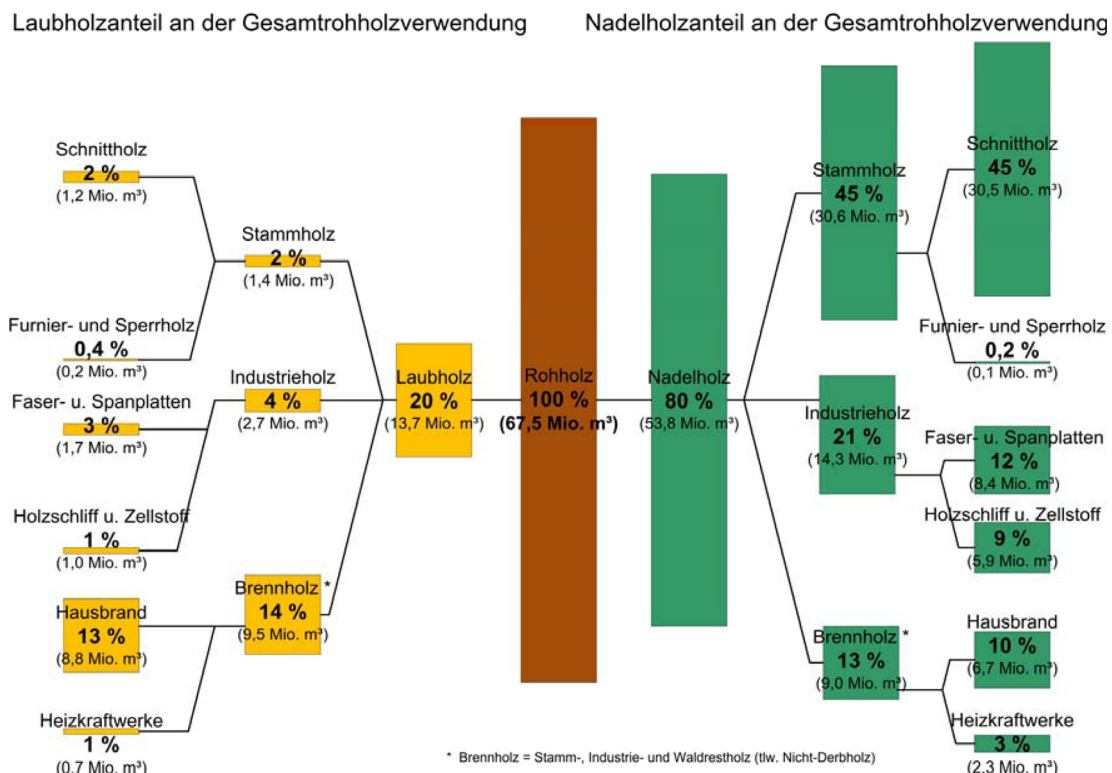


Abbildung 2.3: „Abbildung 3: Abschätzung der inländischen Rohholzverwendung des Jahres 2006 differenziert nach Laub- und Nadelholz, Rohholzsortimenten und Verwendern (Quelle: StBA: Arbeitsunterlage Rohholz und Holzhalbwaren, Lückge & Weber 1997; Mantau & Sörgel 2003; VDP 2007, Mantau & Sörgel 2006, Hick & Mantau 2008, Weimar & Mantau 2006, Mantau et al. 2007, Polley et al. 2009b, eigene Berechnungen)“ [Seintsch 2011], Abbildung 3, S. 10

Holz als natürliche Ressource stellt einen bedeutenden Rohstoff für Werkstoffe der Möbelindustrie, des Bauwesens sowie des Konsumgüterbereiches dar. Das Holz in seiner strukturell unveränderten Form findet als Sägeware, verarbeitet zu Balken und Brettern, im Wesentlichen ohne Zusatzstoffe, Anwendung im Bauwesen. Eine Vergütung dieser Waren findet prozesstechnisch durch Trocknen, Sortieren und Imprägnieren der Erzeugnisse statt. Diese machen mit 47 % (vgl. Abbildung 2.3) den größten Anteil an der Rohholznutzung aus. Die Holzwerkstoffe (vgl. Abbildung 2.4) machen in Summe nur einen Anteil von etwas über 15 % der Rohholznutzung aus.

Der Grad des Holzaufschlusses bestimmt maßgeblich die späteren Eigenschaften der Werkstoffe. Mit steigendem Strukturerhaltungsgrad⁷ nimmt auch die mechanische Leistungsfähigkeit (im Sinne von Steifigkeit und Festigkeit) zu. Homogenität und Isotropie nehmen mit abnehmenden Strukturerhaltungsgrad zu, ebenso die Dichte der Holzwerkstoffe sowie der Energieeinsatz bei deren Herstellung. [Dunky & Niemz 2002], S. 6.

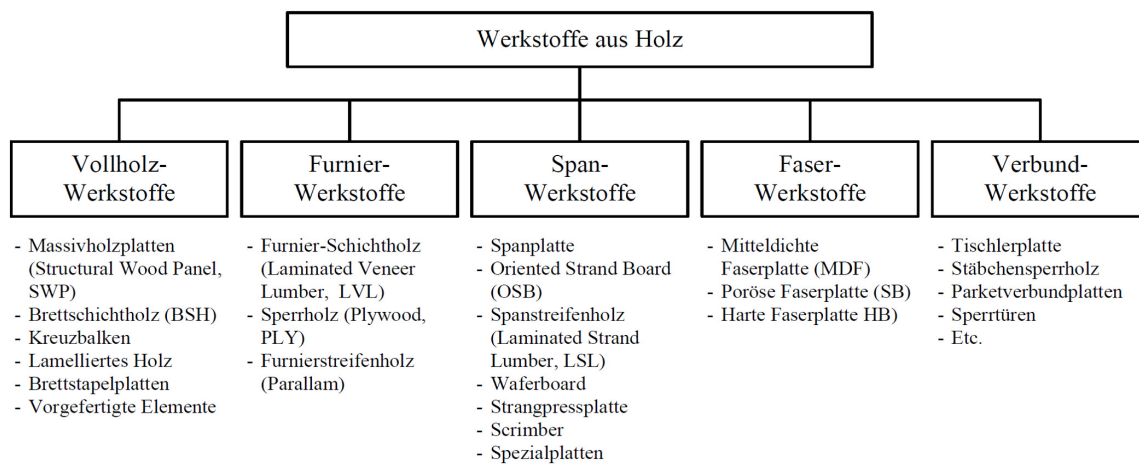


Abbildung 2.4: „Einteilung von Holzwerkstoffen“ nach [Dunky & Niemz 2002], Abbildung 1.5, S. 7

Über die Abhängigkeit der Schlagzähigkeit von der Strukturerhaltung sind keine Aussagen bekannt. Generell lässt sich aber festhalten, dass hohe Strukturerhaltung mit hoher Leistungsfähigkeit aber auch komplexem Materialverhalten einhergeht (vgl. Abbildung 2.5). Die Fehlstellen aus dem Naturstoff werden mit abnehmender Strukturerhaltung homogenisiert, die absolute Leistungsfähigkeit nimmt aber ebenso ab. Die rekombinierten Werkstoffe lassen sich in verschiedene Klassen einteilen. Aktuelle Entwicklungen zielen oftmals auf Hybride aus mehreren Gruppen. Eine mögliche Einteilung bietet Abbildung 2.4.

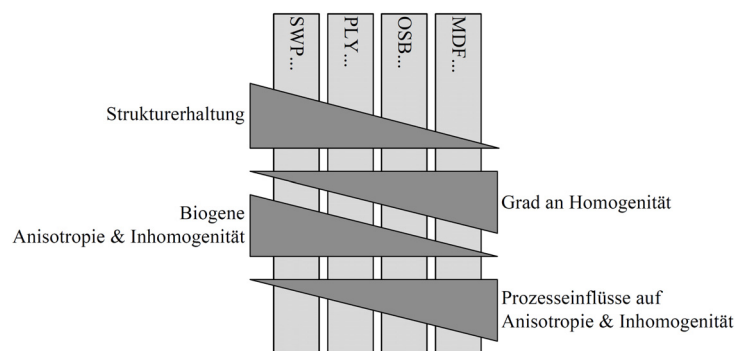


Abbildung 2.5: Homogenisierung mit abnehmender Partikelgröße der Holzwerkstoffe (vgl. [Dunky & Niemz 2002], S. 6)

⁷ Im Rahmen dieser Arbeit wird von Strukturerhaltung als Gegenteil von Holzaufschluss gesprochen. Dieses Vorgehen liegt darin begründet, dass nach Ansicht des Autors biogene Werkstoffe möglichst nah an ihrem Ausgangszustand Verwendung finden sollten. Diese Ansicht resultiert aus günstigeren ökologischen und mechanischen Eigenschaften.

2.3 Holzwerkstoffe - holzanatomische und technologische Eigenschaften

2.3.1 Anatomie des Holzes, Anisotropie und Inhomogenität der Eigenschaften

Das Holz „... die entrindeten Stämme, Wurzeln und Äste der Bäume und Sträucher.“ [Kollmann 1951], S. 1 ist „**Biologisch gesehen:** ein durch Kambiumtätigkeit erzeugtes Dauergewebe **Makroskopisch gesehen:** ein aus verschiedenen Zellen zusammengesetztes Dauergewebe von Nadel- und Laubhölzern **Mikroskopisch gesehen:** die verholzte Zellwand von Nadelholz- und Laubholzzellen sowie die verschiedenen Zusammensetzungen, Anordnungen, Formen, Größen, Inhalte, Anteile und Typen dieser Zellen **Submikroskopisch gesehen:** die verholzte Zellwand speziell bezüglich Schichtenbau, Feinbau (Fibrillenverlauf) und Hohlräume“ [Wagenführ & Scholz 2012], S. 14. Die für den späteren Nutzer, besonders im Fall einer technischen Nutzung im Maschinenbau, wichtigen mechanischen Eigenschaften resultieren in direkter Folge aus der Verteilung der Eigenschaften im Baumstamm, umso mehr, je höher die Strukturerhaltung des Holzwerkstoffes ist. Ebenso resultieren sie aber auch aus dem prozesstechnischen Aufschluss und der Verarbeitung zu einer Holzwerkstoffplatte. Die strukturelle Unterscheidung des Holzaufbaues und die funktionellen Eigenschaften der jeweiligen Bestandteile kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen (vgl. Abbildung 2.6).

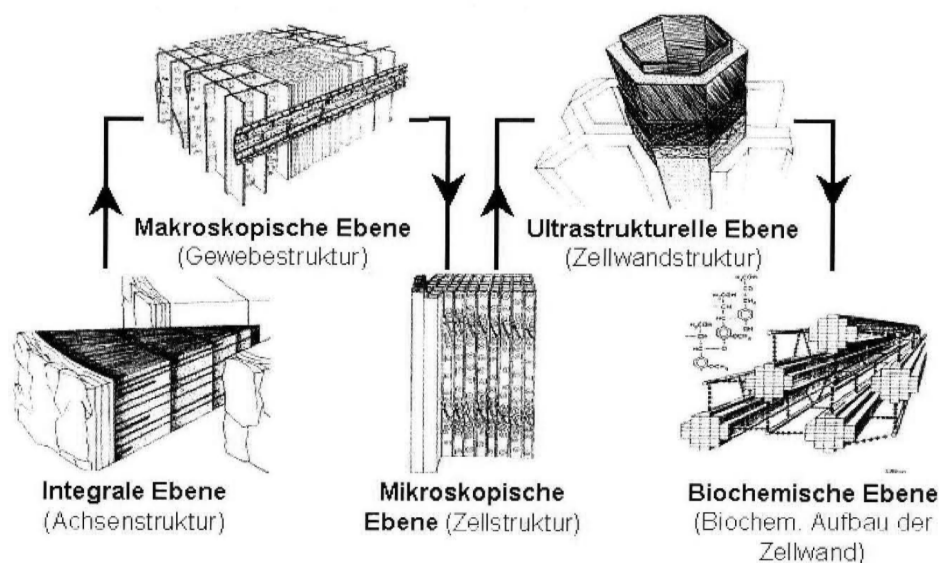


Abbildung 2.6: „Strukturebenen pflanzlicher Achsen am Beispiel eines Koniferenstammes und einer Koniferentracheide“ [Wagenführ 2008], Abbildung 1, S. 6

Aus technischer Sicht und für die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften am wichtigsten ist die Achsenstruktur des Holzes. Diese wuchsbedingte Richtungsabhängigkeit überträgt sich, je nach Aufschlussart und Rekombinationsverfahren, in die Holzwerkstoffplatten. Werkstoffe großer Partikelgröße haben so in aller Regel eine deutlichere Anisotropie und Inhomogenität. Letztere muss aber stets in Betracht der Bauteilgröße (Plattenausschnitt) bewertet werden, da sich lokale Fehlstellen als Inhomogenität in kleineren Proben stärker auswirken als in

Bauteilen größerer Abmessungen. Inhomogenität und Anisotropie werden häufig negativ für technische Anwendungen gesehen. Mit Blick auf moderne Faserverbundwerkstoffe muss dem jedoch entgegengehalten werden, dass anisotrope Eigenschaften keinen Ausschlussgrund für die technische Nutzung darstellen können. „Sowohl die Anisotropie als auch die Inhomogenität werden besonders durch Maschinenbauingenieure als nachteilig wahrgenommen. Dabei ergibt sich gerade aus der Anisotropie ein großes Innovationspotential, Holz als optimierten Werkstoff einzusetzen [Wag08b].“ [Eckardt 2013], S. 29.

Die Hauptschnittrichtungen des Holzstammes werden naheliegenderweise in Zylinderkoordinaten (longitudinal, radial, tangential) angegeben. Diese Hauptachsen, in denen sich die Eigenschaften des Werkstoffs als orthotropes Modell (vgl. u.a. [Wagenführ 2008], S. 17, & [Eberhardsteiner 2002], S. 7) beschreiben lassen, können bei Vollholzprodukten Anwendung finden. Bei Holzwerkstoffplatten ist es hingegen praktisch von den Zylinderkoordinaten abzuweichen und die Koordinatenrichtungen entlang der Plattenrichtungen anzugeben. Für die vorliegende Arbeit wird dies stets so vorgenommen, da ausschließlich plattenförmige Halbzeuge zum Einsatz kommen. Als eine Folge der kontinuierlichen Prozesse bei der Verleimung der Holzbestandteile zu Plattenmaterial resultiert jeweils eine Vorzugsrichtung oder Hauptrichtung. Bei symmetrischen Furnierwerkstoffen kann diese mit der Faserrichtung der Decklage, bei Oriented Strand Boards - OSBs mit der Ausrichtung der Strands an der Oberfläche der Platten angegeben werden. Bei Faser- und Massivholzplatten ist die nachträgliche Identifikation der Plattenhauptrichtung komplizierter. Lotrecht zur Hauptachse in der Plattenebene liegt die Nebenachse.

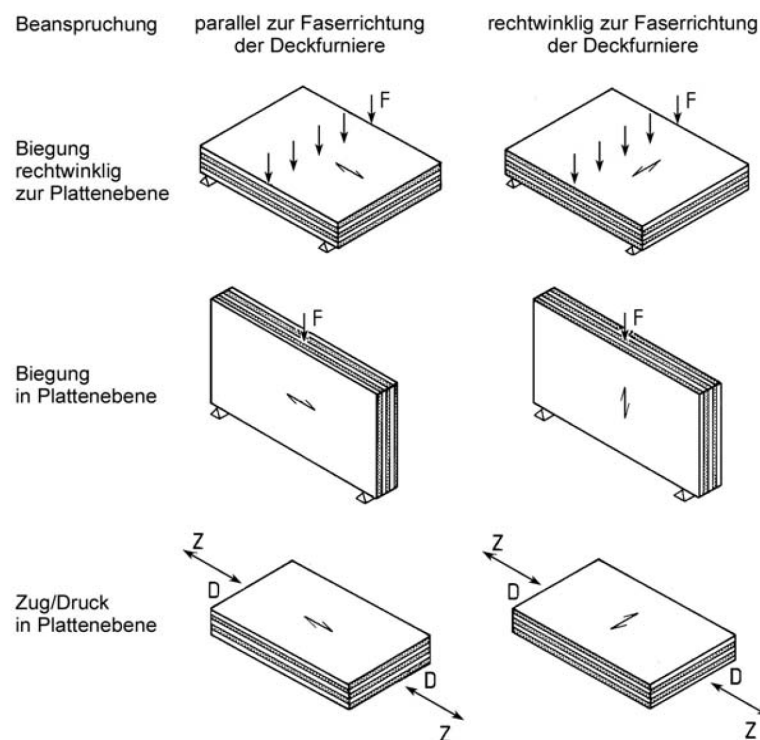


Abbildung 2.7: „Bestimmung von elastomechanischen Eigenschaften von Furniersperrholz“ [Ambrozy 2005], Abbildung 4.1-4, S. 76

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Eigenschaften in den beiden Achsen der Plattenebene wesentlich weniger unterscheiden als die Eigenschaften in Platten- und Scheibenrichtung. In Übereinstimmung mit den Beanspruchungen für die in der Normung (vgl. [DIN EN 12369-1] bis [DIN EN 12369-3]) charakteristische Werte angegeben sind, werden auch die Beanspruchungen in der vorliegenden Arbeit definiert (vgl. Abbildung 2.7). An dieser Stelle muss auf einige, besonders im sprachlichen Umgang diffizile, Inkonsistenzen in der Normung hingewiesen werden. Die nach Kirchhoff (vgl. [Hake 2007], S. 67 ff.) benannte Plattentheorie ist ein Berechnungsmodell für ebene Flächentragwerke. Es sind nur Lasten senkrecht zur Plattenebene zulässig, wohingegen Belastungen in der Plattenebene nicht berücksichtigt werden können (vgl. Widerspruch zwischen Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8). So ist die Biegung in Plattenebene eigentlich als Scheibenbelastung zu bezeichnen, ebenso Zug- / Druckbelastung in Plattenebene. Als Folge für die Nomenklatur der vorliegenden Arbeit wird die in Abbildung 2.7 bezeichnete Belastung „Biegung rechtwinklig zur Plattenebene“ (parallele Faserrichtung der Deckfurniere) als **Plattenbelastung**, und die in Abbildung 2.7 bezeichnete Belastung „Biegung in Plattenebene“ (parallele Faserrichtung der Deckfurniere) als **Scheibenbelastung**, deklariert.

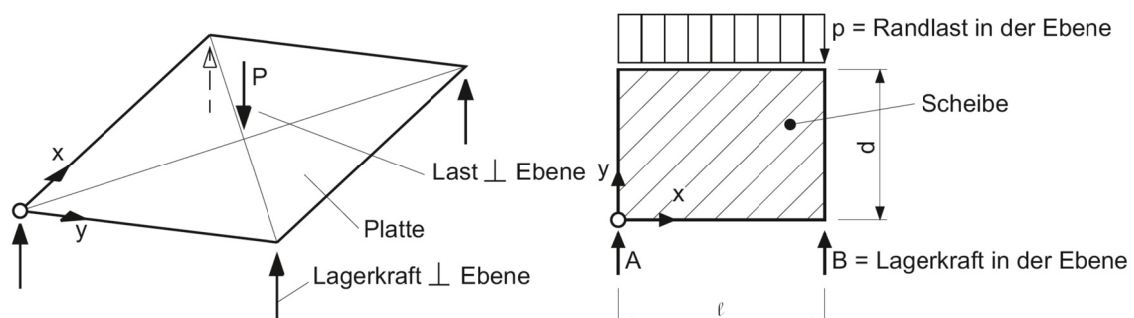


Abbildung 2.8: Links: „Beispiel für eine belastete Platte“ Abbildung 1.3-1; Rechts: „Wandartiger Träger als Beispiel für eine Scheibe“ Abbildung 1.2-1 in [Hake 2007], S. 4 & 5

Die Variabilität der Werkstoffeigenschaften ist, im Gegensatz zur Anisotropie, ein ausschlaggebendes Kriterium für (oder aber auch gegen) dessen technische Nutzung. Die den klassischen metallischen Werkstoffen eigene Streuung der Eigenschaften liegt in deutlich engeren Grenzen als die der Holzwerkstoffe. Beispielsweise wird die Streckgrenze von Stahl mit einem Variationskoeffizienten (Coefficient Of Variation, COV) von 2 - 3 % angegeben, wohingegen die Bruchkraft von Holz unter Zugbeanspruchung mit einem COV von 20 - 40 % deutlich größeren Schwankungen unterliegt [Smith et al. 2003], S. 67. Ähnliche hohe Variationskoeffizienten werden auch für weitere mechanische Eigenschaften angegeben (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Inhomogenität der Werkstoffeigenschaften nach: „Average coefficients of variation for some mechanical properties of clear wood“ [Wood Handbook 2010], Tabelle 6-6, S. 5-26

Property	COV* in %	Property	COV* in %
Static bending		Compression perpendicular to grain	28
Modulus of rupture	16	Shear parallel to grain, maximum shearing strength	14
Modulus of elasticity	22	Tension parallel to grain	25
Work to maximum load	34	Side hardness	20
Impact bending	25	Toughness	34
Compression parallel to grain	18	Specific gravity	10

* „Values based on results of tests of green wood from approximately 50 species. Values for wood adjusted to 12 % moisture content may be assumed to be approximately of the same magnitude.“

2.3.2 Klebstoffe

Dem Klebeprozess bei der Holzwerkstoffherstellung kommt große Bedeutung zu. Sowohl die Klebstoffe wie auch die Prozessparameter haben Einfluss auf die Eigenschaften des fertigen Plattenhalbzeuges. Insofern basiert auch ein wesentlicher Teil der Klassifizierung der Holzwerkstoffe auf der Qualität der Verklebung (bezüglich deren Einsatzmöglichkeiten, vgl. Kapitel 2.6.1, S. 41). Die Klebstoffe für Holzwerkstoffplatten sind in der Regel physikalisch oder chemisch abbindend, wobei die chemisch abbindenden Systeme deutlich in der Überzahl sind. Eine günstige Übersicht der gängigen Systeme lässt sich bei [Ambrozy 2005], S. 35 ff. nachlesen (vgl. Tabelle 2.2, vgl. auch [Dunky & Niemz 2002], S. 247). In den vergangenen Jahren erfuhren die Klebstoffe für Holzwerkstoffe wesentliche Entwicklungsschritte⁸ als Folge von Kostendruck einerseits und sich stetig verschärfenden gesetzlichen Regelungen für die Emission von Formaldehyd und flüchtigen organischen Verbindungen (Volatile Organic Compounds VOCs) andererseits. Es besteht hier eine kaum zu überblickende Menge von Systemen am Markt und in der Entwicklung. Hinzu kommt, dass, infolge länderspezifischer Gesetzgebungen am internationalen Markt, die Destination der Werkstoffe ebenso Einfluss auf die verwendeten Klebstoffe besitzt. Für den Endverbraucher werden kaum detaillierten Angaben über verwendete Klebstoffe gemacht, lediglich die eingehaltenen Spezifikationen werden angegeben. Von Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist das in den geprüften Werkstoffen genutzte Klebstoffsystem im Sinne der Temperaturbeständigkeit. Die duroplastischen Kondensationsharze (UF, MF, PF, RF, MUPF) verfügen über hohe mechanische Festigkeiten und gute thermische Beständigkeit bei Ausschluss hydrolytischer Belastung [Dunky & Niemz 2002], S. 251. PVAC-Klebstoffe besitzen aufgrund ihres thermoplastischen Verhaltens reduzierte Festigkeiten bei steigender Temperatur [Dunky & Niemz 2002], S. 433. PMDI-Klebstoffe sind infolge ihrer Emission von Isocyanaten im Temperaturbereich von über 200 °C kaum geeignet für Anwendungen bei höherer Temperaturexposition [Köhler 2011].

⁸ Dies besonders auch im Hinblick auf biogene Klebstoffe (vgl. [Krug & Tobisch 2010])

Tabelle 2.2: „Klebstoffe für Holz und Holzwerkstoffe“, nach [Ambrozy 2005], Tabelle 3.1-6, S. 37

Klebstoff	Abkürzung	Anwendung*
Harnstoff-Formaldehydharz	UF	Spanplatten im Innenbereich, begrenzte Wasserbeständigkeit, Zunehmend problematisch aufgrund von Emissionsgrenzwerten
Melamin-Formaldehydharz	MF	Innen- und Außenbereich, gute Wasser- und Alterungsbeständigkeit
Phenol-Formaldehydharz	PF	Sperrholz im Innen und Außenbereich, Wasser-, Temperatur- und alterungsbeständig, hohe mechanische Eigenschaften
Resorcin-Formaldehydharz	RF	Sperrholz im Innen und Außenbereich, Wasser-, Temperatur- und alterungsbeständig, hohe mechanische Eigenschaften, Montageklebstoffe höchster Qualität
Polyurethan-Klebstoffe (Isocyanatharze)	PMDI	Spanplatten, MDF, OSB im Innen- und Außenbereich, besonders für Platten niedrigster Formaldehydemission
Melamin-Harnstoff-Phenolformaldehydharz	MUPF	Mischharze zur Herstellung von Holzwerkstoffen (Spanplatten, MDF, OSB) – optimierte Eigenschaften der Klebverbindung
Melamin-Isocyanat-Phenolformaldehydharz	MIUPF	
Polyvinylacetat-Klebstoffe	PVAC	Weißleim, Vorwiegend im Innenbereich, aber auch Fenster und Türen, Montageklebstoff, Modifikation mit Vernetzern für optimierte Eigenschaften möglich

*ohne Anspruch auf Vollständigkeit

2.3.3 Klimatisierungsprozess

Als Klimatisierung des Werkstoffes ist die Aufnahme bzw. Abgabe von Wasser sowie eine Temperaturänderung, beides in Abhängigkeit des umgebenden Klimaregimes, zu verstehen. Beide Prozesse können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden und besitzen zeitliche Verläufe. Je nach Umgebungsklima findet die Wasseraufnahme des Holzes durch unterschiedliche chemische und physikalische Prozesse statt. Wesentliche Prozesse bis zum Fasersättigungspunkt bei ca. 30 % Holzfeuchte (Abbildung 2.9) sind Chemisorption („*Einlagerung von Wassermolekülen zwischen den amorphen Cellulosemicellen*“ [Wagenführ 2008], S. 16), Adsorption („*Wasseraufnahme durch molekulare Anziehungskräfte und Wasseranlagerung an den lumenseitigen Zellwänden*“ [Wagenführ 2008], S. 16) und Kapillarkondensation („*kondensierter Wasserdampf in den Kapillaren*“ [Wagenführ 2008], S. 17). Freie Einlagerungen von Wasser, welche nur bei Kontakt mit flüssigem Wasser entstehen können, führen zu höheren Holzfeuchten, werden hier aber nicht näher berücksichtigt.

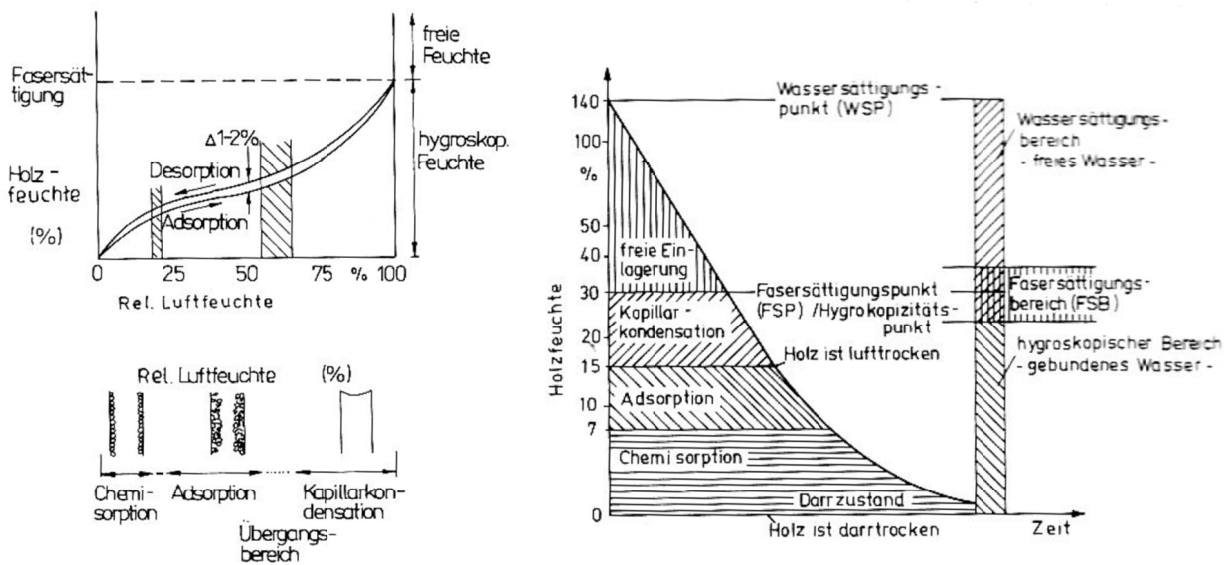


Abbildung 2.9: „Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz“ und „Sorptionsthermen von Holz und Bindungsformen des Wassers“ [Niemz 1993], Abbildung 4/9 und 4/10, S. 46

Die resultierenden Ausgleichsfeuchten variieren nach Holz- bzw. Holzwerkstoffart, die prinzipiellen Verläufe sind aber ähnlich (vgl. Abbildung 2.10). Je höher der Kunstharzanteil des Holzwerkstoffes ist, desto geringer fällt bei identischen Umgebungsbedingungen die Ausgleichsfeuchte aus. Für den Einsatz der prinzipiell brennbaren Holzwerkstoffe, ist die Einsatztemperatur wesentlich. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass es bei industriellen Umgebungsbedingungen nicht zum thermischen Abbau des Holzes kommt, muss doch die Reduktion der mechanischen Werte bei steigender Temperatur berücksichtigt werden (vgl. Tabelle 2.3). Dies ist besonders bei der Substitution metallischer Werkstoffe von Bedeutung, da diese im Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C kaum merklichen Eigenschaftsveränderungen vorweisen.

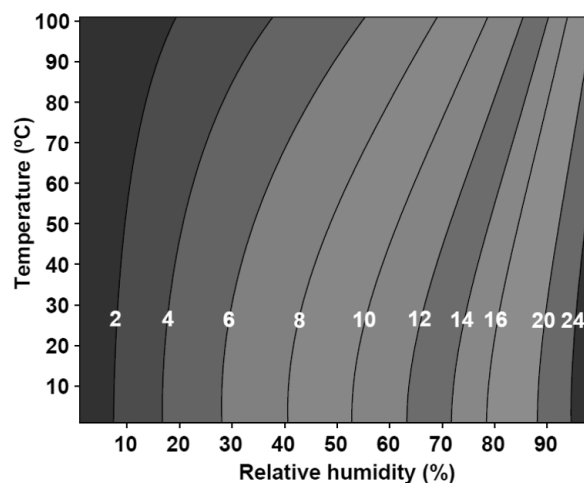


Abbildung 2.10: „Equilibrium moisture content of wood (labeled contours) as a function of relative humidity and temperature.“ [Wood Handbook 2010], Abbildung 4-1, S. 4-3

Es bleibt festzustellen, dass beides, Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand, also die Maßzahlen für die Änderungsgeschwindigkeit der Zustände Temperatur und Feuchtegehalt, dichteabhängig sind. Je höher die Dichte der Werkstoffe ist, desto höher sind auch Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand (vgl. [Ambrozy 2005], S. 44). Dies wiederum bedeutet aber auch, dass Änderungen der mechanischen Eigenschaften bei den verschiedenen Werkstoffen verschieden schnell ablaufen.

Tabelle 2.3: „Wärmeleitzahl von Holzwerkstoffen (Richtwerte)“ nach [Dunky & Niemz 2002], Tabelle 3.5, S. 45; temperaturbedingte Reduktion der mechanischen Eigenschaften nach [Niemz 1993], S. 100; die Werte für Stahl und Aluminium sind Tabellenwerte

Material	Wärmeleitzahl in W/mK	Mechanische Eigenschaft der Holzwerkstoffe (allgemein)	Wert bei 100 °C bezogen auf 20 °C (100 %)
Spanplatte	0,12 - 0,14	Biegefestigkeit	72 % (45 %)*
Sperrholz	0,14	Zugfestigkeit	92 % (89 %)
Poröse Faserplatte	0,05	Druckfestigkeit	56 % (49 %)
MDF	0,13	Zug-E-Modul	88 % (-)
Zementgebundene Spanplatte	0,24 - 0,28	Druck-Elastizitätsmodul	75 % (65 %)
Massivholzplatte	0,12 - 0,14		
Stahl niedriglegiert 37MnSi5	25		
Aluminiumlegierung AlMgSi1	175		

* Wert in Klammern bezieht sich auf kleine fehlerfreie Proben (Feuchtegehalt 7 ... 10 %, Bezugstemperatur 10 °C)

2.4 Holzwerkstoffe - mechanische Eigenschaften

2.4.1 Statisch mechanische Eigenschaften

Grundlegend werden die mechanischen Eigenschaften, also das Verhalten des Werkstoffes unter äußerer Belastung, in statische und dynamische unterschieden. Gemeint ist damit die Zeitabhängigkeit der Zustandsvariablen Verformung, Verformungsgeschwindigkeit und Verformungsbeschleunigung. Bei statischen, im technischen Kontext zumeist quasi-statisch genannten, Belastungen ist die Verformungsgeschwindigkeit nahe bei Null. Zur Gruppe der physikalisch mechanischen Eigenschaften werden die elastischen Eigenschaften, wie beispielsweise Elastizitäts- oder Schubmodul, die Festigkeitseigenschaften, wie Zug-, Druck-, Biegefestigkeit oder Bruchdehnung und die rheologischen Eigenschaften, wie Kriechen und Relaxation, gezählt [Dunky & Niemz 2002], S. 32. Da für die vorliegende Arbeit besonders die mechanischen Eigenschaften bei Biegung von Bedeutung sind, Kriechen und Relaxation weniger⁹, werden in Abbildung 2.11 Bandbreiten der Eigenschaften für verschiedene Holzwerkstoffgruppen, für Scheiben- und Plattenbelastung, angegeben (vgl. Kapitel 2.3.1, S. 29). Es wird deutlich, dass gerade bei OSB und

⁹ Hierzu kann u. a. bei [Bodig & Jayne 1993], Kapitel 5 detailliert nachgelesen werden.

Furnierschichtholz große Bereiche der Eigenschaften abgedeckt werden. So reicht die Biegefestigkeit in Plattenebene von $\sim 2 \text{ N/mm}^2$ bis $\sim 20 \text{ N/mm}^2$ und die Biegesteifigkeit, der Biege-E-Modul, von $\sim 1.500 \text{ N/mm}^2$ bis $\sim 15.000 \text{ N/mm}^2$. Die mechanischen Eigenschaften, sowohl die statischen wie auch die dynamischen, werden von Feuchtegehalt und Temperatur (vgl. Kapitel 2.3.3, S. 33) des Werkstoffes beeinflusst. Mit zunehmenden Feuchtegehalt und Erhöhung der Temperatur sinken Steifigkeit und Festigkeit der Holzwerkstoffe (vgl. [Kollmann 1952]).

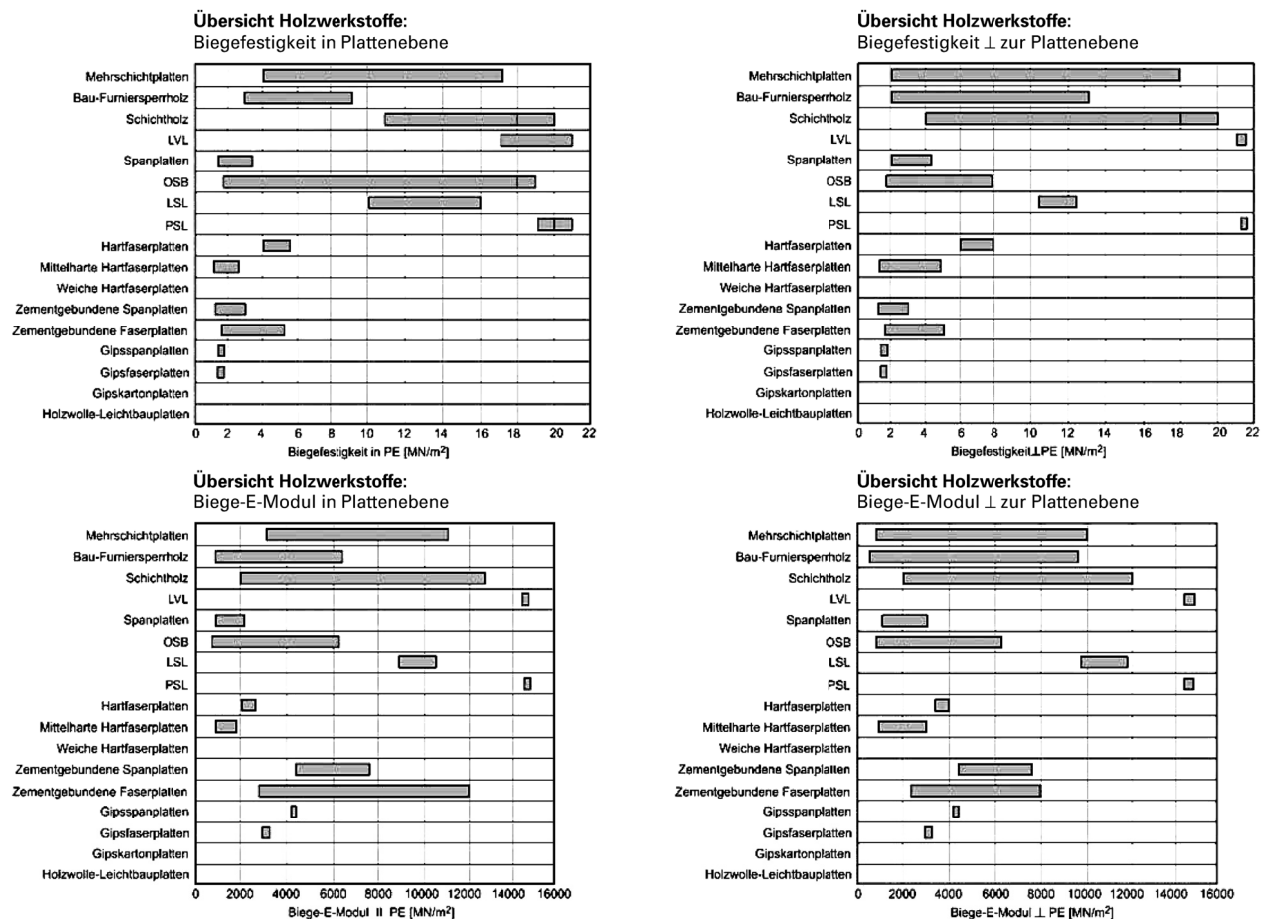


Abbildung 2.11: Übersicht über die Biegeeigenschaften der Holzwerkstoffe [Ambrozy 2005], S. 45

2.4.2 Dynamisch mechanische Eigenschaften

Das Verhalten der Werkstoffe unter dynamischen Belastungen, bei Verformungsgeschwindigkeiten deutlich größer Null, wird durch die dynamisch mechanischen Eigenschaften beschrieben. Im Wesentlichen sind dies Eigenschaften für „... *two types of motion, impact and vibration, both of which are of considerable significance in the mechanical behavior of wood composites.*“ [Bodig & Jayne 1993], S. 230. Es sind die Eigenschaften der Schwingungsvorgänge, zyklischen elastischen Verformungen ohne Werkstoffzerstörung unter Trägheitswirkung

gemeint. Dazu zählt als wichtige Werkstoffeigenschaft die Dämpfung¹⁰. Auch diese unterliegt, neben einer ganzen Reihe möglicher weiterer Einflüsse, dem Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur. Die Dämpfung kann, je nachdem welche Art von Schwingungsvorgängen betrachtet werden, verschieden angegeben werden. Bei freien Schwingungen beispielsweise als logarithmisches Dekrement (vgl. [Becker & Noack 1968]). Die in den Substrukturen der Holzwerkstoffe für die Dämpfung verantwortlichen Effekte beruhen auf vielfältigen physikalischen Vorgängen u. a. Reibung, Risswachstum oder mikroplastischen Verformungen. Die für die vorliegende Arbeit jedoch weitaus wichtigeren Effekte sind diejenigen, die bei einer plötzlichen (schlagartigen) Belastung (engl. *Impact*) auftreten. Der Widerstand den ein Probekörper einer schlagartigen Belastung entgegensetzt, wird als Schlagzähigkeit bezeichnet. Diese wird als Arbeit pro Fläche angegeben, also die Energie die benötigt wird um einen Probekörper definierten Querschnittes vollständig zum Bruch zu führen, bezogen auf dessen Querschnittsfläche. Da es sich bei der Schlagzähigkeit um eine kumulierte Größe handelt, kann diese auf verschiedenem Wege erreicht werden (vgl. Abbildung 2.12). Die Einflüsse, denen die Schlagzähigkeit unterliegt, sind vielfältig und reichen von Temperatur und Feuchtegehalt bis hin zu Dichte, Steifigkeit, Festigkeit oder gar der Schwingungsdämpfung, wobei letztere selbst wieder von der Klimatisierung des Probekörpers abhängen. Es zeigt sich die Komplexität dieses Kennwertes. Zusätzlich sind verschiedene Methoden zur Ermittlung von Schlagzähigkeiten bekannt (vgl. Kapitel 2.5, 2.6.2 und 2.7.1), was den Vergleich der Werte untereinander erschwert. Hinzu kommt die Komplexität der Erfassung der Kraft-Verformungs-Kurven beim Schlagversuch, um differenzierte Aussagen über verschiedenen Werkstoffcharakteristika treffen zu können. Als mögliche Folge wird die Schlagzähigkeit heute selten bei Holzwerkstoffen untersucht, obgleich „*Impact data can be critical to the use of wood composites, particularly as more exacting design requirements are brought to bear.*“ [Bodig & Jayne 1993], S. 235.

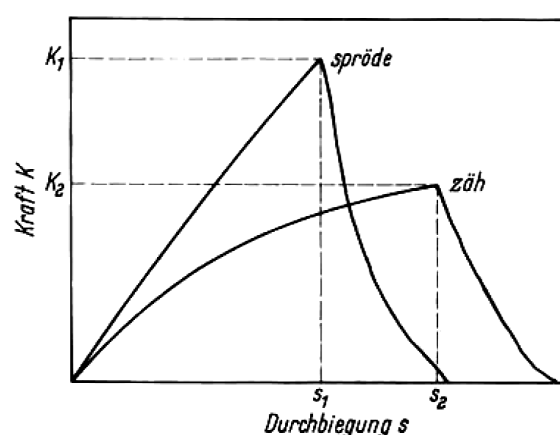


Abbildung 2.12: „Gleiche Flächen unter der Kraft-Durchbiegungslinie bei einem spröden und einem zähen Versuchsstoff“ [Krech 1960], Abbildung 1

¹⁰ Dämpfung ist stets eine System- und keine Werkstoffgröße, wenngleich sie auch vom Werkstoff selbst stark beeinflusst wird.

2.4.3 Abgrenzung zwischen Bruch- und Schlagzähigkeit

Grundsätzlich ist im Kontext der Bruchuntersuchung zwischen bruchmechanischen Untersuchungen mit definiert kontinuierlichem Rissfortschritt und Schlagversuchen mit unkontrolliertem und damit auch nicht bewertbarem Rissfortschritt zu unterscheiden. Für beide Verfahren existieren Normen und eine ganze Reihe an durchgeführten Untersuchungen in der Literatur. Gleichzeitig können beide Versuchstypen, aufgrund des bei beiden vorliegenden Bruchs und dessen wesentlichen Einfluss auf den Versuchsablauf, nicht völlig losgelöst voneinander betrachtet werden. „Zwischen der Kerbschlagarbeit, KV, und der Bruchzähigkeit, K_{Jd} oder J_{Id} ... besteht eine relativ enge qualitative Verwandtschaft Beide charakterisieren auf ihre Art das Bruchverhalten eines Werkstoffs in Gegenwart versprödender Bedingungen wie Spannungskonzentration, Mehrachsigkeit, Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit.“ [Schindler 2001]. Es gibt Ansätze beide Versuche theoretisch zu verknüpfen (vgl. [Schindler 2001]). Einer der wesentlichen Unterschiede beider Versuchsarten, neben der grundsätzlich verschiedenen Zielstellung (die Bruchmechanik will gezielt das Bruchwachstum beschreiben), liegt in der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Während beim Schlagversuch, infolge der schlagartigen Belastung, große Verformungsgeschwindigkeiten erreicht werden, sind diese bei bruchmechanischen Versuchen relativ gering, ähnlich denen quasi-statischer Versuche. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum Schlagversuch besteht in der Einbringung eines (Schwingungs-) Anrisses in den Kerbgrund der Probekörper. Es bleibt festzustellen, dass das Versagen bei versprödenden Bedingungen (vgl. oben) wie Spannungskonzentration und Mehrachsigkeit durch bruchmechanische Untersuchungen abgebildet werden kann.

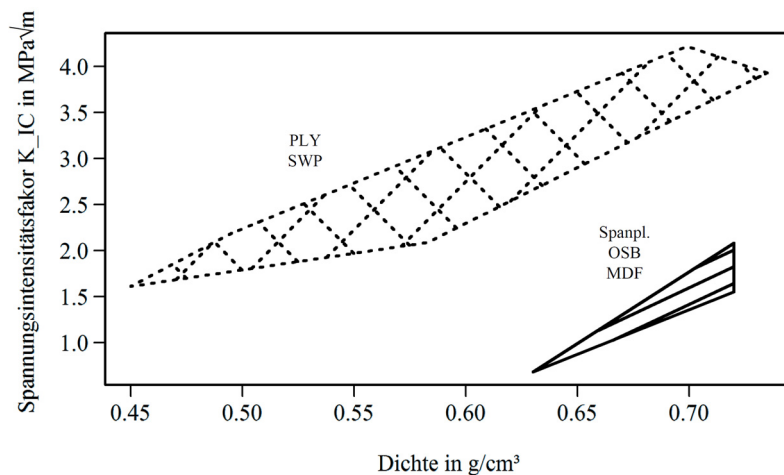


Abbildung 2.13: Daten des Diagramms aus: „Bruchzähigkeit K_{IC} verschiedener Holzwerkstoffe (Zusammengestellt von Niemz)“ [Dunky & Niemz 2002], Tabelle 3.15, S. 88; Mittelwerte von K_{IC} über der Dichte dargestellt für die Werkstoffgruppen Sperrholz und Massivholzplatten (PLY und SWP) und für Span- und Faserwerkstoffe

Der versprödende Einfluss hoher Belastungs- bzw. Beanspruchungsgeschwindigkeiten bleibt aber bei diesen Untersuchungen außen vor. Hierzu sind Schlagversuche geeignet. Gerade wenn es sich um nicht, im Sinne eines Anrisses, vorgeschädigte Proben handelt. Die Zielstellung

der vorliegenden Arbeit, diese dynamisch impulsartigen Belastungen zu untersuchen, macht die Nutzung von Schlagversuchen, als geeignetes Mittel zur Charakterisierung und Klassifizierung der verschiedenen Holzwerkstoffe, erforderlich. Dennoch bieten Kennwerte, wie der kritische Spannungsintensitätsfaktor im Mode I¹¹, einen Ausblick auf die auch bei den Schlagversuchen zu erwartenden Relationen der verschiedenen Werkstoffklassen PLY (Plywood), SWP (Structural Wood Panel), OSB (Oriented Strand Board), MDF (mitteldichte Faserplatte) und Spanplatte zueinander (vgl. Abbildung 2.13).

2.5 Bedeutung der Schlagversuche bei verschiedenen Werkstoffgruppen

Schlagversuche unterscheiden sich je nach dem geprüften Werkstoff in Versuchsaufbau, Ablauf und Parametern wie auch in ihrer Zielstellung, also in der Verwendung der erlangten Ergebnisse. Unterschieden wird generell zwischen Verfahren, die entweder genügend Energie zuführen, um mit einem einmaligen Schlag einen Bruch bzw. endgültiges Werkstoffversagen herbeizuführen oder Verfahren bei denen die Energie nicht für ein Versagen ausreicht und so eher das Absorptionsverhalten untersucht wird. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit der Schlagversuche ergibt sich aus den verwendeten Proben. Diese können ungekerbt, gekerbt oder auch gekerbt mit Schwingungsanriss sein. Die Prüfung der Schlagzähigkeit bzw. der Kerbschlagzähigkeit bei metallischen, und hier vor allem den **Stahlwerkstoffen**, dient in erster Linie der Charakterisierung der Werkstoffe für die Anwendung unter verschiedenen Einsatzbedingungen sowie der Qualitätsprüfung. „Die Kerbschlagbiegeprüfung nach Charpy (DIN EN ISO 148) eignet sich vorwiegend nur für die Feststellung der Trennbruchneigung eines Werkstoffes und für die Überwachung der Güte und Gleichmäßigkeit von Wärmebehandlungen oder Schweißnähten.“ [Bargel 2012], S. 155. Es muss generell zwischen gekerbten und ungekerbten Proben unterschieden werden. Versuche an gekerbten Proben lassen Aussagen über die Spödruchneigung generell, wie aber auch über deren Abhängigkeit von der Temperatur bzw. dem Gefügestand zu. „Neben dem Nachweis der Spödruchneigung der Konstruktionsstähle wird der Kerbschlagbiegeversuch zur Kontrolle der Qualität und Gleichmäßigkeit von Gefüge- und Behandlungszuständen sowie zur Untersuchung von Alterungserscheinungen genutzt.“ [Böhme et al. 1975], S. 81. Versuche ohne Kerbe hingegen dienen der Charakterisierung des Verhaltens bei Beanspruchungen mit lokalen Spannungskonzentrationen. Die mit ungekerbten Proben ermittelten Kennwerte dienen u.a. der Beurteilung der Eignung der geprüften Werkstoffe für umformende Fertigungsverfahren und dem Einsatz in Anwendungen die schlagende Beanspruchungen mit sich bringen. Den Kennwerten aus der Schlagprüfung gekerbter wie auch ungekerbter Proben ist grundsätzliche gemein,

¹¹ Auf die Nennung weiterer Details zur Bruchmechanik wird an dieser Stelle verzichtet. In Bezug auf Holz und Holzwerkstoffe geben [Smith et al. 2003], Kapitel 4 „Principles of Fracture Mechanics“ und [Bucur 2011], Kapitel 4 „Initiation and Growth of Delamination in Wood and Wood-Based Composites, a Fracture Mechanics Approach“ einen näheren Einblick.

dass die ermittelten Kennwerte nicht als Rechenwerte für die Dimensionierung von Bauteilen eingesetzt werden dürfen. Dies gilt für alle Konstruktionswerkstoffe. „Das Verfahren darf nicht als Datenquelle für Konstruktionsberechnungen von Bauteilen dienen.“ [DIN EN ISO 179-2]. Bei **Kunststoffen** werden Schlagversuche zur Bestimmung des Übergangs von Spröd- zu Zähbruchbereich genutzt. So können Anwendungsgrenzen definiert werden. „Für die Konstruktionsrechnung sind sie nicht verwertbar. Sie sind aber für die Auswahl eines Kunststoffs von Nutzen ...“ [Oberbach & Saechtling 2004], S. 103. „Die Schlagzähigkeit, fälschlicherweise auch als Schlagbiegefestigkeit bezeichnet, zählt zu den dynamischen Eigenschaften. Sie kennzeichnet das Verhalten von **Holz und Holzwerkstoffen** gegen schlagartige Beanspruchung, wie sie z. B. in der Praxis an Werkzeugstielen auftritt.“ [Niemz 1993], S. 166¹². Aufgrund der einfach und schnell durchzuführenden Untersuchung mithilfe von Schlagprüfungen dien(t)en diese in der Holzwerkstoffindustrie zur Prozessüberwachung aber auch zur Charakterisierung der „dynamischen Güte des Holzes“ [Schönbach 1939]. Die mittels Schlagprüfung ermittelten Kennwerte dienen aktuell als Maß für die Steigerung der mechanischen Leistungsfähigkeit bei der Untersuchung thermisch oder chemisch vergüteter Holzwerkstoffe (vgl. [Tjeerdsma & Pfeiffer 2006], [Kubojima, Okano & Ohta 2000] oder [Evans, Beutel, Hoggett & Stodart 1991]). Ebenso kann die Bruchschlagarbeit als ein Indikator für die Dauer- bzw. Wechselfestigkeit genutzt werden (vgl. Abbildung 2.14).

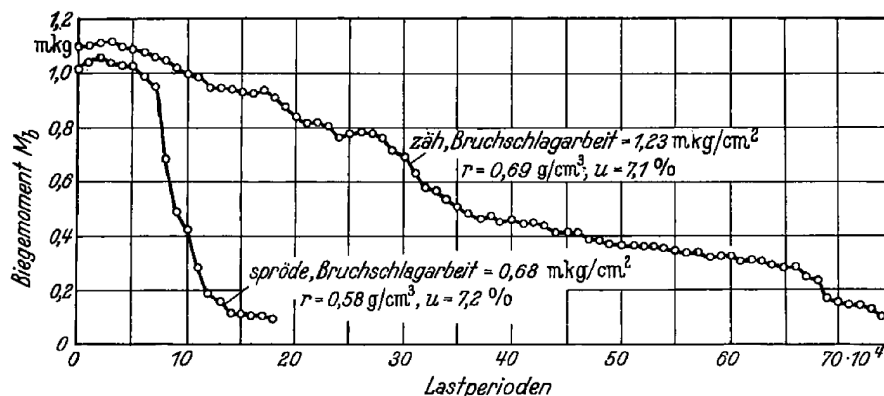


Abbildung 2.14: „Lastkurven für kleine Lastspielintervalle, aufgenommen an zähem und sprödem Eschenholz. (Nach F. Kollmann)“ [Kollmann 1951], Abbildung 785, S. 869

¹² Niemz macht hier keine Aussage warum der Begriff „Schlagbiegefestigkeit“ falsch sei. Es kann aber angenommen werden, dass die Begründung darin besteht, dass Festigkeiten in der Regel bezogene Kraftgrößen sind wohingegen die Schlagzähigkeit eine flächenbezogene Arbeit darstellt.

2.6 Normative Grundlagen

2.6.1 Klassen der Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe können nach verschiedenen Kriterien in Gruppen eingeordnet werden. Eine Möglichkeit der Gruppenbildung ist die nach dem Verwendungszweck, bzw. den Anwendungsbedingungen. Zusätzlich lassen sich die gängigen Halbzeuge nach dem Aufschlussgrad des Holzes unterteilen. So werden u.a. Faser-, Span-, Furnier- und Massivholzplatten benannt.

Tabelle 2.4: Klassifizierung der Holzwerkstoffe

	Klassifizierung		
	Norm	Kriterien	Details*
Faserwerkstoffe			
HB - MB - SB	[DIN EN 316]	Herstellungsverfahren	Trockenverfahren - Nassverfahren
/ - H - E	[DIN EN 316]	Anwendungsbereich	tb (/), fb (H), ab (E)
/ - L - A - S	[DIN EN 316]	Verwendungszweck	- allgemeine Verwendung kein Kurzzeichen (/) - tragende Verwendung (L) a) für alle Kategorien der Lasteinwirkungsdauer (A) b) nur für Momentan- und Kurzzeitbelastung (S)
Spanwerkstoffe			
P1 - P7	[DIN EN 312]	Anwendungsbereich	
OSB/1 - OSB/4	[DIN EN 300]	Anwendungsbereich	tb + nt; tb + t; fb + t; fb + t + hochbelastbar
Sperrholz			
F3 - F80	[DIN EN 636]	Biegeeigenschaften	Festigkeitsklassierung der 5%-Fraktilwerte
E5 - E140	[DIN EN 636]	Biegeeigenschaften	Steifigkeitsklassierung der 5%-Fraktilwerte
Trocken – Feucht – Außen	[DIN EN 636]	Anwendungsbereich	Klassifizierung nach der Qualität der Verklebung und der biologischen Beständigkeit
Furnierschichtholz			
LVL/1 - LVL/3	[DIN EN 14279]	Anwendungsbereich	Klassifizierung nach der Qualität der Verklebung und der biologischen Beständigkeit
Massivholzplatten			
SWP/1 - SWP/3 NS	[DIN EN 13353]	Anwendungsbereich	tb + nt, fb + nt, ab + nt
SWP/1 - SWP/3 S	[DIN EN 13353]	Anwendungsbereich	tb + t, fb + t, ab + t
SWP/1 - SWP/3 SD	[DIN EN 13353]	Anwendungsbereich	tb + t, fb + t, ab + t mit deklarierten Werten

*Abkürzungen: tb - Trockenbereich, fb - Feuchtbereich, ab - Außenbereich, t - tragend, nt – nicht-tragend

In [DIN EN 13986] wird eine Aufzählung verschiedener Holzwerkstoffe vorgenommen, die implizit eine Gliederung nach der Partikelart beinhaltet. „Diese Norm gilt für Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen in Form von Massivholzplatten, Furnierschichtholz (LVL), Sperrholz, Platten aus langen, schlanken, ausgerichteten Spänen (OSB), kunstharzgebundenen und zementgebundenen Spanplatten, Faserplatten nach dem Nassverfahren (harte Platten, mittelharte

Platten, poröse Platten) und Platten nach dem Trockenverfahren (MDF). ... Diese Norm gilt nicht für Holzwerkstoffe zur Verwendung außerhalb des Bauwesens.“ [DIN EN 13986], S. 4. Eine Klassifizierung der Holzwerkstoffe wird innerhalb der die jeweilige Werkstoffgruppe betreffenden Norm (vgl. Tabelle 2.4) vorgenommen. Eine Klassifizierung der Holzwerkstoffe außerhalb des Bauwesens findet nicht statt.

2.6.2 Versuchseinrichtungen und Methoden der Schlagprüfung

Tabelle 2.5 gibt eine zusammenfassende Übersicht der geltenden Normen der Schlagprüfung für metallische Werkstoffe, Kunststoffe und Holz. Allen hier angeführten Normen ist gemein, dass die Prüfung auf einem Schlagwerk in der Form eines Pendels durchgeführt wird. Im Bereich der metallischen Werkstoffe von Bedeutung ist die Prüfung der Kerbschlagbiegearbeit nach Charpy. „Diese verbrauchte Schlagarbeit ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegen schlagartige Belastung.“ [DIN EN 10045], S. 2. Seit Januar 2011 gilt hierzu [DIN EN ISO 148-1] welche die [DIN EN 10045] ablöst. Darin sind zwei Kerbgeometrien (V- bzw. U-Kerb) angegeben. Diese werden in [DIN EN ISO 50115] um weitere drei Probengeometrien ergänzt. Für die instrumentierte Schlagprüfung gilt [DIN EN ISO 14556]. Hieraus ergeben sich in Kapitel 3.6.1, S. 80 einige Spezifikationen für den Aufbau des Messsystems bzw. für die Auswahl der Komponenten. Für die Prüfung der (Kerb-) Schlagzähigkeit im Kunststoffbereich gilt [DIN EN ISO 179-1] und [DIN EN ISO 179-2] nach dem Charpy-Verfahren und [DIN EN ISO 180] nach dem Izod-Verfahren. Beide Normen ermöglichen je nach Werkstoffgruppe gekerbte oder ungekerbte Proben.

Tabelle 2.5: Methoden der (Kerb-) Schlagbiegeprüfung bei verschiedene Werkstoffen in der Normung

Norm	Bereich / Inhalt	Werkstoffgruppe	Aktualität
DIN EN ISO 148-1 bis -3	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	Stahl	2011 / 2009 / 2009
DIN EN ISO 14556	Kerbschlagversuch nach Charpy (V-Kerb) Instrumentierets Prüfverfahren	Stahl	2006
DIN 50115	Kerbschlagbiegeversuch - besondere Probenform und Auswerteverfahren	Stahl	1991
DIN 51222	Kerbschlagbiegeversuch besondere Anforderungen an Pendelschlagwerke mit einem Nennarbeitsvermögen < 50 J und deren Prüfung	Stahl	1995
DIN EN ISO 179-1 und -2	Bestimmung der Charpy-Schlagzähigkeit	Kunststoffe	2008 / 2000
DIN EN ISO 180	Bestimmung der Izod-Schlagzähigkeit	Kunststoffe	2007
DIN 52189	Schlagbiegeversuch - Bestimmung der Bruchschlagarbeit	Holz	1981
ASTM D 3499	Standard Test Method for Toughness of Wood- Based Structural Panels	Holzwerkstoffe	2011

Für die Prüfung von Holz „... zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit von Holz, an kleinen, fehlerfreien Proben.“ [DIN 52189] ist im Rahmen der DIN EN nur die hier zitierte Norm vorhanden. Es wird nicht gesondert auf die Holzwerkstoffe eingegangen und es werden keine gekerbten Proben vorgeschlagen¹³. Im Bereich der ASTM ist die [ASTM D3499-11] für die Schlagprüfung an Holzwerkstoffen bekannt. Die typische Probengeometrie der einzelnen Methoden wird in Kapitel 3.2.2, S. 73 gegenüber gestellt, um daraus die für diese Arbeit erforderlichen Probenmaße abzuleiten.

2.7 Versuchstechnik zur Schlagprüfung

2.7.1 Entwicklung der Schlagprüfung an Holz und Holzwerkstoffen

Zur qualitativen Bewertung der Hölzer wurden schon im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts Schlagversuche durchgeführt. Als Ausgangspunkt wissenschaftlicher Auseinandersetzung mit Schlagversuchen an Holz und Holzwerkstoffen können W. K. Hatt und W. P. Turner angesehen werden. Sie präsentierten bereits 1906 ein Fallwerk für verschiedenartige Versuche. Die später als „Hatt-Turner Impact Maschine“ bezeichnete Vorrichtung blieb lange Zeit in Gebrauch. [ASTM-Proceedings 1922]. In der Folge haben sich im europäischen Bereich Prüfungen mit Pendelhämmern durchgesetzt, nachdem eine Weile auch Fallwerke genutzt wurden [Ghelmeziu 1938]. Die Schlagprüfung wurde in dieser Zeit mit DIN 52189/05.39 auch genormt. Das Nachfolgedokument 52189/12.81 ist aktuell noch gültig, auch wenn ihm kaum noch Bedeutung zukommt. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Bruchschlagarbeit wurden in der zwischenliegenden Zeit erarbeitet, häufig mit dem Fokus auf Massivholz. So wurden von [Ghelmeziu 1938] holzanatomische Faktoren wie Dichte oder Spätholzanteil aber auch versuchstechnologische Parameter wie Faser-Last-Winkel, Holzfeuchtigkeit und Probenabmessungen an Voll- und Schichtholz verschiedener Holzarten untersucht. Von zunehmenden Interesse für die Forschung war ab ca. 1940 die Aufzeichnung der Kraft-Verformungs-Kurven beim Schlagversuch. Hier wurden, neben mechanischen Verfahren (beim Hatt-Turner-Fallwerk), auch erste Piezoelemente zum Einsatz gebracht z. B. von Andreevskij 1939 (vgl. in [Hennig et al. 1940]) oder auch von Kollmann (vgl. [Kollmann 1940]). Generell lässt sich sagen, dass Kollmann mit seinen systematischen Untersuchungen und der Weiterentwicklung der Prüfvorrichtungen wesentlichen Einfluss auf das Wissenschaftsgebiet genommen hat. Die hier genannten und auch weitere Ergebnisse dieser Zeit zum Themengebiet Schlagbiegeversuche an Holz und Holzwerkstoffen sind ausführlich in [Kollmann 1951], S. 822 - S. 865 zusammengefasst. Es war nun möglich, den Kraftverlauf während des Bruchvorganges zeitlich aufgelöst zu untersuchen (vgl. Abbildung 2.15). In der Folge wurden weitere Anstrengungen unternommen um, die Messtechnik

¹³ Bereits [Kollmann 1951] weist auf das Fehlen einer Norm für die Schlagprüfung an Holzwerkstoffen (Sperrholz) hin. „Es wäre deshalb an der Zeit, auch den Schlagversuch an Sperrholz zu normen.“ [Kollmann 1951], S. 855. Dies gilt bis heute.

zu verbessern und die Zusammenhänge bei den Schlagversuchen detaillierter zu beschreiben. So sind bei [Krech 1960], [Schneider 1966] und [Bröker & Salamon 1989] Möglichkeiten zur Instrumentierung von Vorrichtungen zur Messung der Kräfte bei Schlagversuchen mittels Dehnmessstreifen (DMS) angegeben. Hier sind auch wesentliche Effekte der Vorrichtungen auf die Versuchsergebnisse sowie Anforderungen an die Messkette skizziert. Erste differenzierte Betrachtungen des zeitlichen Verlaufs des Kraft- und Wegverlaufes beim Schlagbiegeversuch zeigt [Krech 1960].

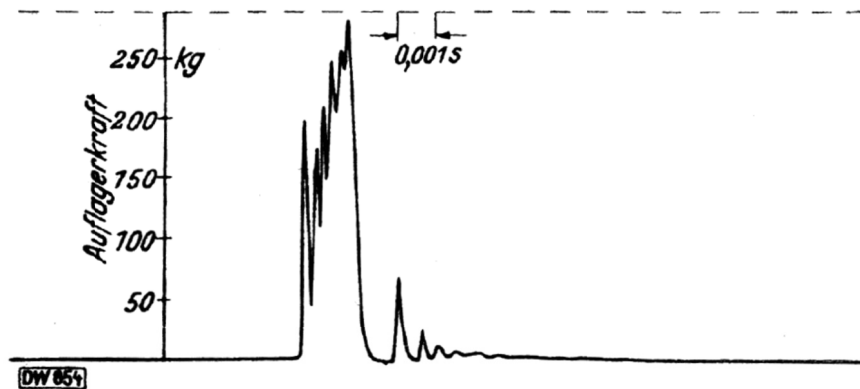


Abbildung 2.15: „Die zeitlichen Schwankungen der Auflagerkraft beim Bruchschlagversuch Messungen mittels des piezoelektrischen Indikators von Zeiss-Ikon Werstoff: Schichtholz Tbu 20, $u = 6,6\%$ “ [Kollmann 1940], Abbildung 31

Einige Jahrzehnte später ergänzen [Bröker & Salamon 1989] den Messaufbau dahingehend, dass die Kräfte beim Schlag simultan an Widerlager und Hammerfinne aufgezeichnet werden. Es wird nun der gesamte Bruchverlauf charakterisiert und bestimmte Zeit- (bzw. Verformungs-) abschnitte phänomenologisch zugeordnet. Abbildung 2.16 „... zeigt, daß zu Beginn des Schlagbiegeversuches die Kraft zunächst steil ansteigt und danach ebenso steil bis unter den Ausgangswert wieder abfällt. Diese erste Kraftspitze, ... wird in der heutigen Literatur als Beschleunigungsstoß oder „inertial peak“ bezeichnet und allgemein der Trägheit der Probe zu geschrieben Die vollständige Entlastung des Kraftaufnehmers nach der ersten Berührung läßt sich durch einen teilweise elastischen Stoß erklären. Dieser Stoß führt bei den vorliegenden Massenverhältnissen dazu, daß sich die Probenmitte mit einer größeren Geschwindigkeit als die Hammerfinne in Schlagrichtung weiterbewegt, so daß diese entlastet wird. Durch die Verformung der Probe verringert sich die Geschwindigkeit der Probenmitte, so daß ein erneuter Kontakt mit der Hammerfinne erfolgt. Von diesem Zeitpunkt an bis zum Bruch dürften Hammer, Probe und Widerlager als mehr oder weniger gekoppeltes System in Kontakt bleiben. Nach dem Beschleunigungsstoß steigt die Kraft wieder an, fällt nochmals stark ab und erreicht dann das Maximum. Bei einem spröden Bruch ... geht der Wert rasch auf Null zurück. Bei einem zähen Bruch ... wird bis zur Entlastung des Kraftaufnehmers noch ein verhältnismäßig großer Weg (Probendurchbiegung) zurückgelegt und dabei ein entsprechender Energieanteil verbraucht. Der letzte Teil der Kurve ist gekennzeichnet durch ein Ausschwingen des Aufnehmers in der Hammerfinne. Bei eini-

gen Proben wurde nach dem Bruch ein nochmaliges Ansteigen der Kraft festgestellt. Dieser Effekt beruht auf dem Durchziehen der noch nicht völlig getrennten Probenhälften durch die Widerlager. Die verbrauchte Energie bis zur Maximalkraft wird hier mit Reißinitiationsenergie, der Restenergieverbrauch als Reißausbreitungsenergie bezeichnet.“ [Bröker & Salamon 1989].

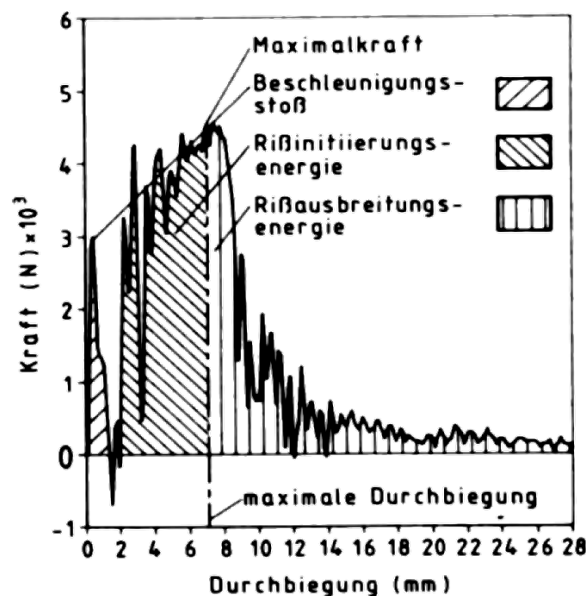


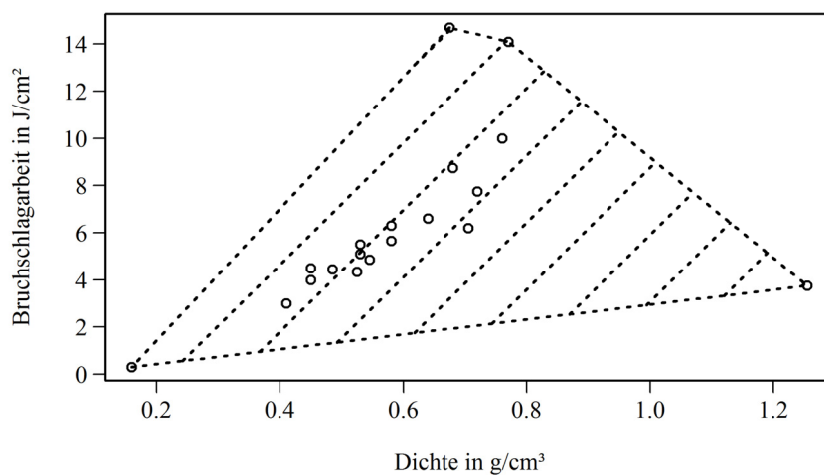
Abbildung 2.16: "Kraft-Weg-Diagramm (Weg = Probendurchbiegung) von einem instrumentierten Schlagbiegeversuch (Azobe/Bongossi)" [Bröker & Salamon 1989], Abbildung 6

Damit ist die zeitliche Beschreibung der Vorgänge beim Bruch erarbeitet und eine Interpretation der Messergebnisse, über den bloßen Vergleich der Brucharbeiten hinaus, möglich. Dies erscheint für die vorliegenden Arbeit insofern notwendig, da die Brucharbeit ein kumulativ aus Weg und Kraft zusammengesetzter Wert ist. Dieser Wert kann demzufolge auf verschiedenen Wegen erreicht werden, was wiederum die Gefahr gleicher Werte der Bruchschlagarbeit für charakteristisch völlig verschiedene Werkstoffe birgt (vgl. Abbildung 2.12, S. 37). Bis heute werden, wenn auch nur vereinzelt, Studien an Holz und Holzwerkstoffen auf Basis von Bruchschlagversuchen durchgeführt wie [Niemz 1994], [Kubojima et al. 2000], [Leijten 2004], [Tjeerdsma & Pfeiffer 2006] oder [de Palacios, Esteban, Garcia; Guindeo, Fernandez & Canteli 2008] zeigen. Abschließend zeigen Tabelle 2.6 und Abbildung 2.17 die Bandbreite der Schlagzähigkeit verschiedener Hölzer in Abhängigkeit von deren Dichte. Von Balsa, Eibe, Robinie und Pockholz abgesehen, zeigt sich ein guter linearer Zusammenhang zwischen Schlagzähigkeit und Dichte. Es ist davon auszugehen, dass die Schlagzähigkeiten bei Holzwerkstoffen in ähnlichen Bereichen liegen, wobei auch erwartet werden kann, dass ebenso wie bei den Vollhölzern deutliche Streuungen und Dichteabhängigkeiten auftreten. Es sind Versuche an Schichthölzern bekannt (vgl. [Kollmann 1951], S. 853 ff. und [Schneider 1966]), die hier aber nicht eingeordnet werden sollen, da die jeweiligen Versuchsbedingungen sich von denen der Vollhölzer stark unterscheiden.

Tabelle 2.6: Bruchschlagarbeit und Rohdichte für verschiedene Hölzer, Daten aus [Wagenführ & Scholz 2012], Anlage 2, Tabelle 1, S. 122 „*Eigenschaften (Mittelwerte) ausgewählter Holzarten (nach [10])*“

	Balsa	Birke	Buche	Douglasie	Edelkast.	Eibe	Eiche	Erle	Esche	Fichte
Bruchschlagarbeit*	0,3	8,75	10	4,85	5,65	14,7	6,2	5,1	7,75	4,5
Rohdichte in g/cm ³	0,16	0,68	0,76	0,55	0,58	0,68	0,71	0,53	0,72	0,45
	Hemlock	Kiefer	Lärche	Pappel	Platane	Pockholz	Redwood	Robinie	Tanne	
Bruchschlagarbeit*	4,45	5,5	6,3	4,35	6,6	3,75	3	14,1	4	
Rohdichte in g/cm ³	0,49	0,53	0,58	0,53	0,64	1,26	0,41	0,77	0,45	

* Werte in J/cm²

Abbildung 2.17: Diagramm nach Werten aus [Wagenführ & Scholz 2012], Anlage 2, Tabelle 1, S. 122 „*Eigenschaften (Mittelwerte) ausgewählter Holzarten (nach [10])*“

2.7.2 Instrumentierung der Schlagprüfung

Die typische Form des Pendels, das von einer Hochlage ausgelöst, im unteren Umkehrpunkt mit höchster Geschwindigkeit auf die gegen ein Widerlager abgestützte Probe trifft, ist bei den in Kapitel 2.6.2, S. 42 genannten Normen und auch bei einem Großteil der im vorhergehenden Kapitel betreffenden zitierten Literatur gleich. Die Instrumentierung dieser Pendelhämmer oder Pendelschlagwerke entstammt dem Wunsch nach einer zeitlich und örtlich differenzierten Beschreibung des dynamischen Bruchvorganges. Erste Lösungen waren technisch noch verhältnismäßig kompliziert zu realisieren, besonders die Möglichkeit der ausschließlich grafischen Datenanalyse setzte hier Schranken. „Die auf den Quarzgeber übertragenen Auflagerimpulse werden in elektrische Ladungen umgesetzt und steuern nach geeigneter Verstärkung einen Kathodenstrahl-Oszillographen.“ [Kollmann 1952]. Umso mehr gilt es den Forschern der damaligen Zeit aus heutiger Perspektive Respekt für deren Einfallsreichtum, bei der Messbarmachung hochdynamischen Effekte, zu zollen. Später wurden dann Dehnmessstreifen auch in der Ham-

merfinne, dem bewegten Teil des Schlagpendels, eingeführt. Besonders die digitale Datenverarbeitung bietet heute die Möglichkeit zu tieferem Verständnis der Effekte beim Schlagversuch.

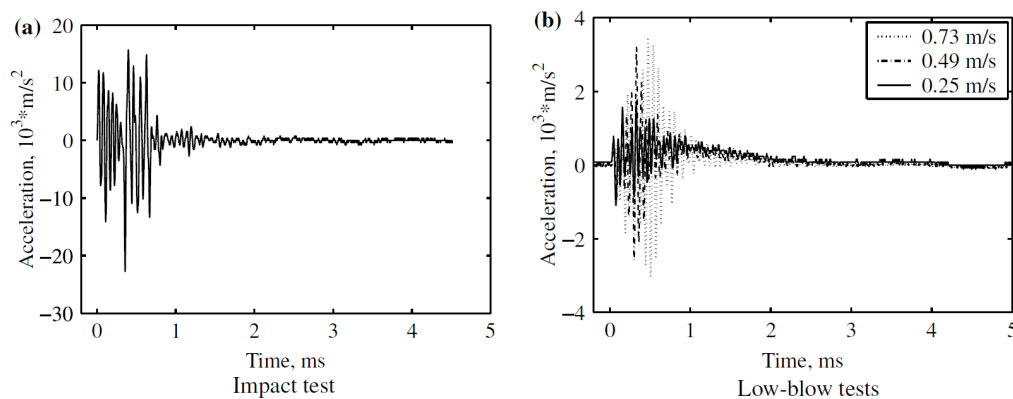


Abbildung 2.18: „Acceleration signals from the Charpy and low-blow tests with potential energies 3–5% of machine capacity.“ [Shterenlikht, Hashemi, Yates, Howard & Andrews 2005], Abbildung 6

Es sind Versuchseinrichtungen bekannt, die in der Hammerfinne mit einem Beschleunigungssensor und / oder Dehnmessstreifen ausgerüstet sind. Je feiner der Bruchvorgang zeitlich aufgelöst erfasst wird, je deutlicher treten auch die durch den Schlag angeregten Eigenschwingungen (der Probe und der Prüfvorrichtung) in den Fokus. Es zeigt sich, dass starke Oszillationen das Signal derart verrauschen können, dass eine Bewertung des Bruchvorganges nicht möglich ist. Dies gilt vor allem bei der Bewertung von Beschleunigungssignalen gemessen an der Hammerfinne (vgl. Abbildung 2.18). „The signal has a highly oscillatory nature. In fact the oscillations are so high that the determination of the characteristic points on the plot, such as crack initiation, is impossible. ... These oscillations are a result of a complex interaction of dynamic responses in all parts of the test rig. The acceleration signal related to the fracture propagation in a specimen is only a small part of the total signal registered by the accelerometer. Significant additional analysis has to be applied to the raw acceleration signal to extract useful fracture information.“ [Shterenlikht et al. 2005]. Eine weitere Möglichkeit der Instrumentierung ist die Ausstattung der Probe mit Dehnmessstreifen. Diese Art der Instrumentierung ist für die Prüfung von Stahlwerkstoffen durchgeführt worden (vgl. [Lee & Hong 1997]). Ungünstig ist hierbei allerdings der technische Aufwand, da auf jede Probe ein DMS appliziert werden muss. Zudem ist mit der Zertörung des DMS während des Versuches zu rechnen. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Bewertung der mit Dehnmessstreifen auf der Hammerfinne gemessenen Kurven (vgl. Abbildung 2.19). Diese weisen eine deutlich geringere bis gar keine Überlagerung mit Schwingungen auf. Ähnliche Ergebnisse sind aus den bei [Lorriot, Martin, Quenisset & Rebiere 1998] aber auch schon aus [Schneider 1966] & [Krech 1960] dargestellten Kraftverläufen ableitbar. Es lässt sich zusammenfassen, dass die Art und Weise wie und wo bei der Schlagprüfung gemessen wird, wie auch der mechanische Aufbau der Prüfvorrichtung, einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

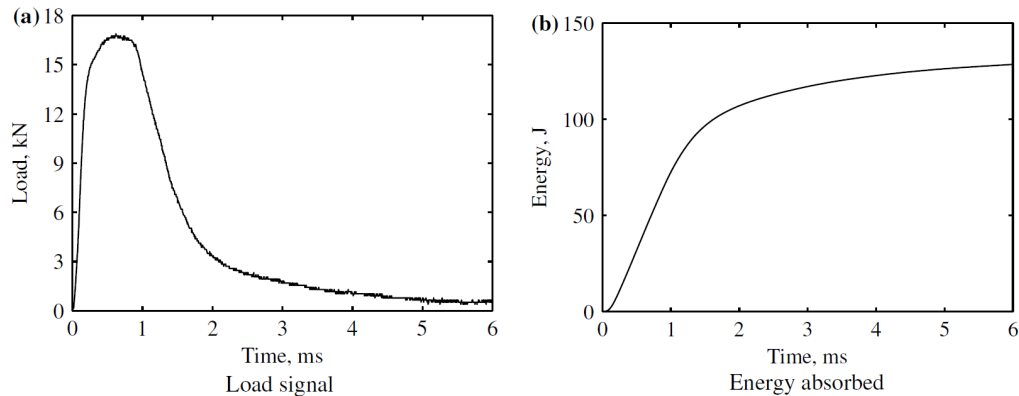


Abbildung 2.19: „Load signal obtained with strain gauges and the energy absorbed calculated via double integration of that signal.“ [Shterenlikht et al. 2005], Abbildung 9

2.8 Einflussfaktoren auf die Schlagzähigkeit

2.8.1 Dichte, Feuchtigkeit und Temperatur

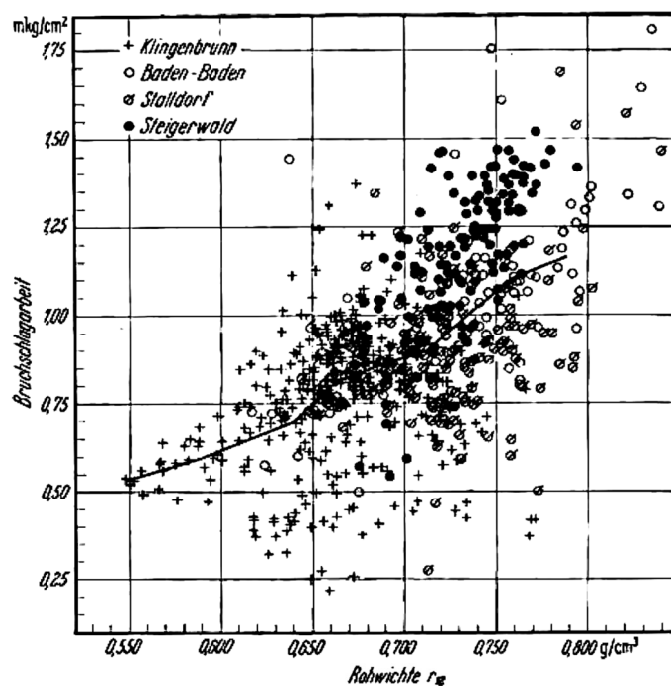


Abbildung 2.20: „Zusammenhang zwischen Rohwichte und Bruchschlagarbeit“ [Pechmann 1953], Abbildung 2

Am Beginn der Schlagprüfung von Holz und Holzwerkstoffen stand die Unterscheidung der Qualität der verschiedenen Holzsorten anhand deren physikalischer und anatomischer Eigenschaften im Vordergrund. [Schönbach 1939] vergleicht verschiedene Wuchsgebiete von Lärchenholz anhand der Schlagarbeit. Er unterscheidet zusätzlich nach Splint- und Kernholz. Vergleichbare Untersuchungen hat auch [Pechmann 1953] an Rotbuchenholz durchgeführt (vgl.

Abbildung 2.20). Die Gegenüberstellung von Bruchschlagarbeit und Dichte bei [Pechmann 1953], Abbildung 2, [Schönbach 1939], Abbildung 5 oder [Kollmann 1951], Abbildung 756, S. 844 gleichen sich qualitativ. Mit zunehmender Dichte steigt im Mittel auch die Bruchschlagarbeit. Es kann festgestellt werden, dass jeglicher Einfluss, der von holzanatomischen Charakteristika auf andere mechanische Eigenschaften wie beispielsweise die Biegesteifigkeit oder Biegefestigkeit einwirkt, sich ebenso auf die Schlagzähigkeit auswirkt. Die wesentlichen Einflussgrößen und deren Auswirkungen sind ausführlich bei [Kollmann 1951], Kapitel 447, S. 822 - 865 zusammengefasst.

In den vorgenannten Quellen wurden teils auch die Variationen der Bruchschlagarbeit infolge der Ausgleichsfeuchte der Werkstoffproben ermittelt. Hierauf soll nun detaillierter eingegangen werden. Zunächst bleibt festzuhalten, dass Feuchtigkeit (gleich ob relative Luftfeuchtigkeit oder Ausgleichsfeuchte der Werkstoffe) und Temperatur stets gemeinsam zu betrachten sind (vgl. Kapitel 2.3.3), da sich in Abhängigkeit des Temperaturgradienten zwischen Umgebung und Bauteil auch das Sorptionsverhalten der Holzwerkstoffe ändert. In Bezug auf die Bruchschlagarbeit zeigt sich ein Einfluss der Holzfeuchtigkeit schon im Bereich gebrauchstüblicher Schwankungen der Holzfeuchte unterhalb des Fasersättigungsgrades (vgl. Abbildung 2.21).

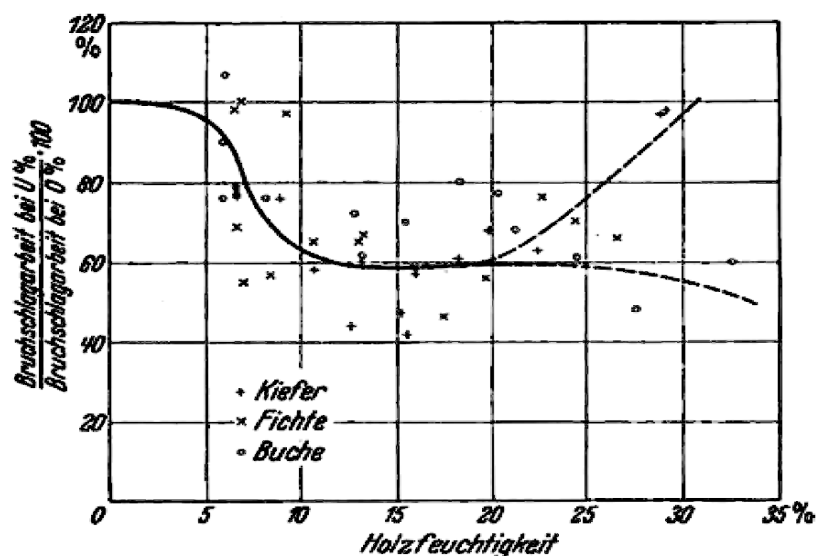


Abbildung 2.21: „Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Bruchschlagarbeit bei Kiefer, Fichte und Buche“ [Ghelmeziu 1938], Abbildung 19

Ebenso wird deutlich, dass markante Streuungen der Werte vorhanden sind, die teilweise die Effektgröße verschiedener Ausgleichsfeuchten übersteigen (vgl. Abbildung 2.21). „Ungefähr ab 23 % traten infolge nicht einwandfreien Zerbrechens der Stäbe und damit höherer Auflagerreibung unverhältnismäßig große Werte auf ...“ [Ghelmeziu 1938]. Bei feuchten Proben werden infolge der Erweichung des Holzes größere Durchbiegungen erreicht. Die kumulierte Bruchschlagarbeit muss aber nicht in jedem Fall ansteigen an (vgl. Abbildung 2.12, S. 37 und Abbildung 2.23). Bei [Niemz 1993] zeigt sich im Bereich bis ca. 20 % Holzfeuchtigkeit ein ähnli-

ches Verhalten mit einer Hochlage (oder Maximum) der Bruchzähigkeit im Bereich kleiner 5 % Holzfeuchtigkeit. Der Anstieg oberhalb von 20 % lässt sich hier allerdings nicht beobachten (vgl. Abbildung 2.22).

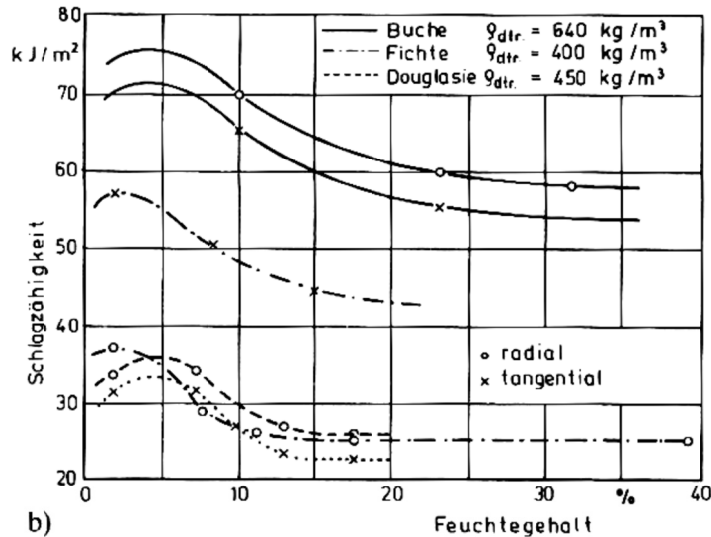


Abbildung 2.22: „Einfluss von Darrdichte und Feuchtegehalt auf die Schlagzähigkeit von Holz (a) Darrdichte, (b) Feuchtegehalt“ [Niemz 1993], Abbildung 12/45 (b), S. 167

Eine Erklärung für die nahezu konstant bleibende Bruchschlagarbeit ab ca. 10 % Holzfeuchtigkeit liefert [Krech 1960] mit der Angabe der zugehörigen Bruchdurchbiegung und Bruchspannung (vgl. Abbildung 2.23). Es zeigt sich, dass mit zunehmender Feuchtigkeit die Durchbiegung bis zum Bruch ansteigt, die Bruchspannung jedoch abfällt. In der Kumulation heben sich diese Effekte auf und führen so zu nahezu gleich bleibenden Arbeitswerten. Eine ähnliche Aussage trifft auch [Kollmann 1951]. „In der Literatur wird der Holzfeuchtigkeit für die Bruchschlagarbeit keine oder nur eine geringe Bedeutung beigemessen.“ [Kollmann 1951], S. 847. Wobei dort im Folgenden widersprüchliche Ergebnisse verschiedener Untersuchungen diskutiert werden. An dieser Stelle wird nochmals die Wichtigkeit einer differenzierten Analyse der Kraft-Verformungs-Kurven beim Schlagversuch deutlich.

Der Temperatureinfluss auf die Bruchzähigkeit muss im Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt beurteilt werden. Verschiedene Temperaturen zeigen teils völlig unterschiedliche Einflüsse in Abhängigkeit der Holzfeuchte. Vorliegende Untersuchung beschäftigten sich hauptsächlich mit der Schlagprüfung verschieden feuchter und unter den Gefrierpunkt abgekühlter Proben. Bei lufttrockenem (Kiefern-) Holz (Feuchtegehalt $u \sim 10\%$) tritt im Bereich von 0°C bis 20°C keine merkliche Veränderung auf. Wohingegen im Bereich von 0°C bis -60°C deutliche Variationen der Schlagzähigkeit beobachtet werden [Kollmann 1951]. Abbildung 2.24 gibt einen Überblick über die möglichen Einflüsse der Temperatur, Dichte und Holzfeuchtigkeit auf die Bruchschlagarbeit. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die gut gezeichneten Ausgleichskurven sicher eher dem Wunsch nach einer „sauberen“ Charakterisierung des Werkstoffverhaltens, als tatsächlich erhobener, fein aufgelöster und eng beieinanderliegender Messreihen entstammen.

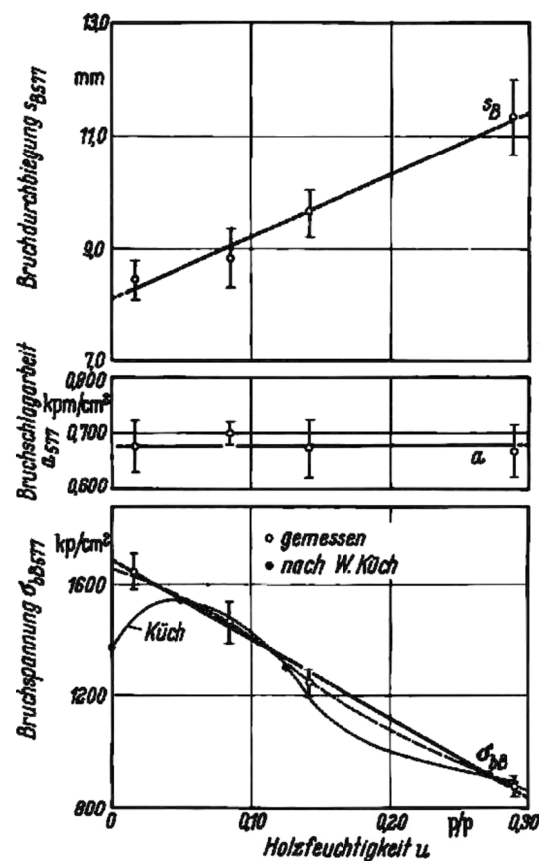


Abbildung 2.23: „Zusammenhang zwischen Bruchspannung (unten), Bruchschlagarbeit (Mitte) und Bruchdurchbiegung (oben) und der Holzfeuchtigkeit u , beobachtet an Rotbuchenstäben. Die Werte sind statistisch auf die Darrwichte $v_0 = 0,577 \text{ p/cm}^3$ umgerechnet.“ [Krech 1960], Abbildung 16

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass Temperatur und Holzfeuchtigkeit für sich genommen im Anwendungsbereich von Holzwerkstoffen nur einen geringen, im Zusammenspiel mit der Dichte aber einen deutlichen Einfluss auf die Bruchschlagarbeit besitzen.

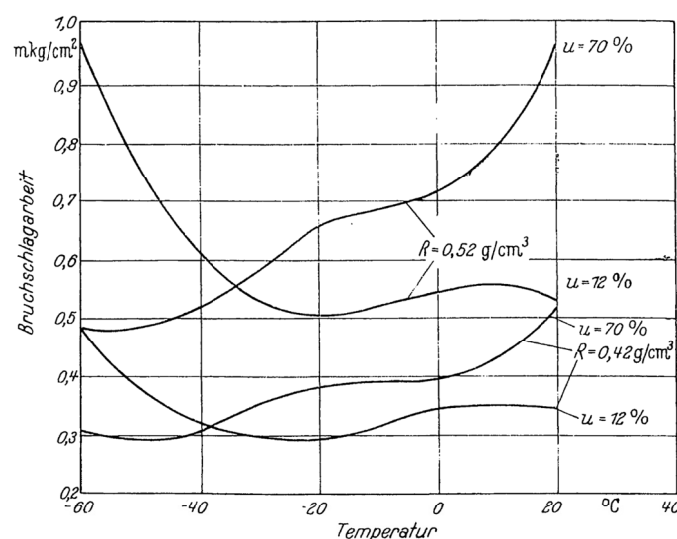


Abbildung 2.24: „Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit von der Temperatur bei Kiefernholz (Nach B. Thunell).“ [Kollmann 1951], Abbildung 762, S. 850

2.8.2 Thermische Schädigung von Holz und Holzwerkstoffen

Die im vorangehenden Kapitel genannten Einflüsse von Temperatur und Holzfeuchtigkeit beziehen sich stets auf Variationen dieser Parameter im Rahmen typischer Einsatzbedingungen von Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen. So werden Temperaturen bis 40 °C und häufig auch Holzfeuchtigkeiten im Bereich unterhalb der Fasersättigung angegeben. Neben diesen klimatischen Schwankungen, die auch als Folge der gewöhnlichen jahreszeitlichen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderung in gemäßigten Klimazonen interpretiert werden können, sollte bei Holzwerkstoffen stets die Möglichkeit einer (unerkannten) thermischen Schädigung in Betracht gezogen werden. Zu dieser Schädigung kommt es, wenn sich die Gefügestruktur und die chemische Zusammensetzung der Hölzer / Holzwerkstoffe aufgrund thermisch induzierter Zersetzungsprozesse verändert. Der Beginn dieser Prozesse kann in den Bereich um 100 °C verortet werden (vgl. Abbildung 2.25), da hier zunächst das im Holz enthaltene Wasser in die Gasphase übergeht und so einen messbaren Gewichtsverlust hervorruft. Bei fortschreitender Temperaturerhöhung finden weitere chemische Zersetzungsprozesse statt¹⁴. Wichtig ist, dass diese thermisch induzierten Veränderungen des Holzes Auswirkungen auf dessen physikalisch-mechanische Eigenschaften besitzen. Bei üblichen produktionstechnischen Umgebungsbedingungen treten diese hohen Temperaturen großflächig und dauerhaft nicht auf. Lokal und / oder unbeabsichtigt ist es jedoch durchaus möglich, dass Temperaturwerte von über 100 °C erreicht werden. Im Folgenden werden einige beispielhafte Szenarien skizziert, wie es zu einer solchen thermischen Beanspruchung im industriellen Einsatz kommen kann.

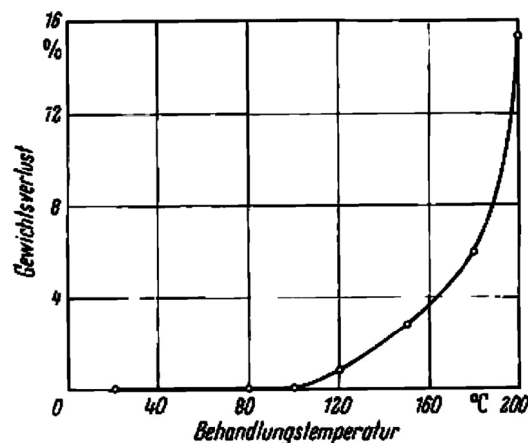


Abbildung 2.25: „Gewichtsverlust von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur des Holzes, Behandlungsdauer jeweils 24 h.“ [Kollmann et al. 1969], Abbildung 34

Örtlich starke Temperaturbeanspruchungen können beispielsweise an Lüftergehäusen von Motoren, in der Nähe (heißer) medienführender Leitungen, durch Prozessabwärme oder durch direkte Sonneneinstrahlung erreicht werden. Bei Lagerung und Transport der Plattenwerkstoffe oder der Bauteile aus Holzwerkstoffen können durch Stauwärme z. B. in einem

¹⁴ [Kollmann, Schmidt, Kufner, Fengel & Schneider 1969] bieten hier einen Überblick über die Thematik.

abgestellten Trailer oder Container deutliche und vor allem relativ lang andauernde Temperaturbeanspruchungen zu Stande kommen. Auch können lokal starke Temperaturbeanspruchung bei Verarbeitungsprozessen (spanende und formgebende Verfahren, Oberflächenbehandlung z. B. Beschichtung) zur Herstellung von Bauteilen aus Holzwerkstoffen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Als Folge erscheint die Berücksichtigung thermischer Beanspruchung bei höheren Temperaturen für diese Arbeit notwendig. In der vorhandenen Literatur ist besonders auf die Arbeit von [Kubojima et al. 2000] hinzuweisen. Hier werden Schlagversuche an Fichtenholz durchgeführt, mit dem Ziel den Einfluss der Dauer der Warmlagerung bei 160 °C auf die Schlagzähigkeit zu ermitteln. Dieser zeigt sich deutlich im Verhältnis der Schlagarbeiten von wärmebehandeltem Holz zur nicht behandelten Kontrollgruppe (vgl. Abbildung 2.26).

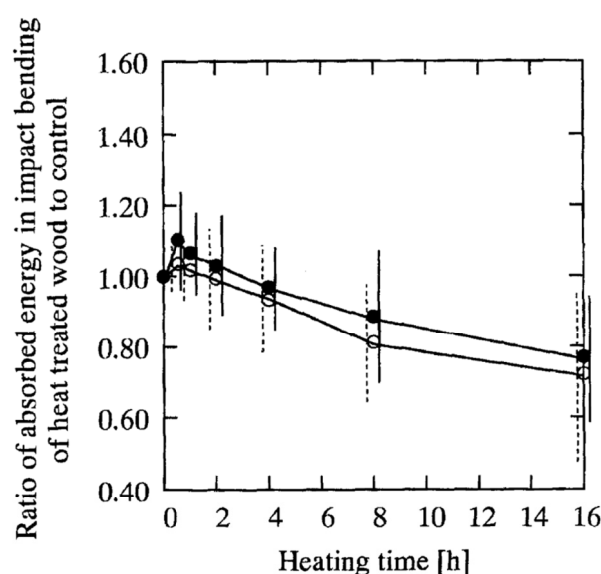


Abbildung 2.26: „Changes in absorbed energy in impact bending. Values are the average of the W_{ib} / W_{ibc} for each group, W_{ib} , absorbed energy in impact bending of heat-treated wood; W_{ibc} , absorbed energy in impact bending of control. Refer to Fig. 7 for explanation of symbols“ [Kubojima et al. 2000], Abbildung 141

[Oltean, Teischinger & Hansmann 2011] konnten keinen Einfluss der Trocknungstemperatur bei technisch getrockneten Hölzern im milden Temperaturbereich auf die mechanischen Eigenschaften feststellen. Im Temperaturbereich von 45 °C bis 80 °C der Trocknungstemperatur mit korrespondierenden Feuchtegehalten von 20 % bis 16 % konnten keine statistisch nachweisbaren Änderungen von Biegesteifigkeit, Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit an Norwegischer Fichte nachgewiesen werden [Oltean et al. 2011]. Wohingegen bei höheren Trocknungstemperaturen kleinere bis deutliche Effekte der Reduzierung von Elastizitätsmodul und Festigkeit in verschiedenen Studien¹⁵ nachgewiesen wurden [Oltean, Teischinger & Hansmann 2007]. „Negative Outcomes during elevated temperature during drying processes are the depolymerization of hemicellulose resulting in reduced hygroscopicity and further loss of strength and increase in brittleness of treated wood. By Increasing the drying temperature, the moisture gradients increa-

¹⁵ Vgl. hier auch [Xie, Fu, Wang, Xiao & Militz 2013]

se, which leads to high internal stresses that are released as cracks.“ [Oltean et al. 2007]. Diese Tendenz lässt sich auch für Holzwerkstoffe nachweisen, wobei [Sinha, Nairn & Gupta 2012] sich in ihren Untersuchungen auf die Bruchzähigkeit beziehen. „With exposure to elevated temperatures, G_{ss} of all the material decreased while the mode of failure was mostly unaltered. The highest drop in G_{ss} (the steady-state energy release rate (G_{ss}) Anm. d. A.), however, was associated with the wood composites rather than solid lumber. The greater the resin content in the composite, the greater was the drop. Hence, LVL and plywood had a greater drop in G_{ss} than OSB.“ [Sinha et al. 2012]. Es kann zusammengefasst werden, dass Temperaturen von unter 100 °C keine oder nur unbedeutende Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Holzwerkstoffe besitzen, wohingegen Temperaturen über 100 °C zu einer Reduzierung der mechanischen Leistungsfähigkeit führen. Mit zunehmender Dauer der Warmlagerung gehen die mechanischen Kennwerte zurück.

2.8.3 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Von zentraler Bedeutung ist der Vergleich zwischen statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch bzw. den daraus ermittelten charakteristischen Werten für die verschiedenen Werkstoffe. Verändert sich das Energieaufnahmevermögen von statischer zu schlagartiger Belastung stark nach unten, ist dies kritisch zu bewerten, da es so zu einem Versagen sicherheitsrelevanter Bauteile kommen kann. Ebenso wichtig ist die Veränderung der gesamten Bruchcharakteristik mit der Belastungsgeschwindigkeit. Es ist offensichtlich, dass bei beiden Versuchen unterschiedliche Effekte auftreten, die das Werkstoffverhalten beeinflussen. Dennoch bestehen zwischen den beiden Versuchsarten deutliche Korrelationen (vgl. Abbildung 2.27 und Abbildung 2.28), die ihre Ursache in der Ähnlichkeit der Versuche haben.

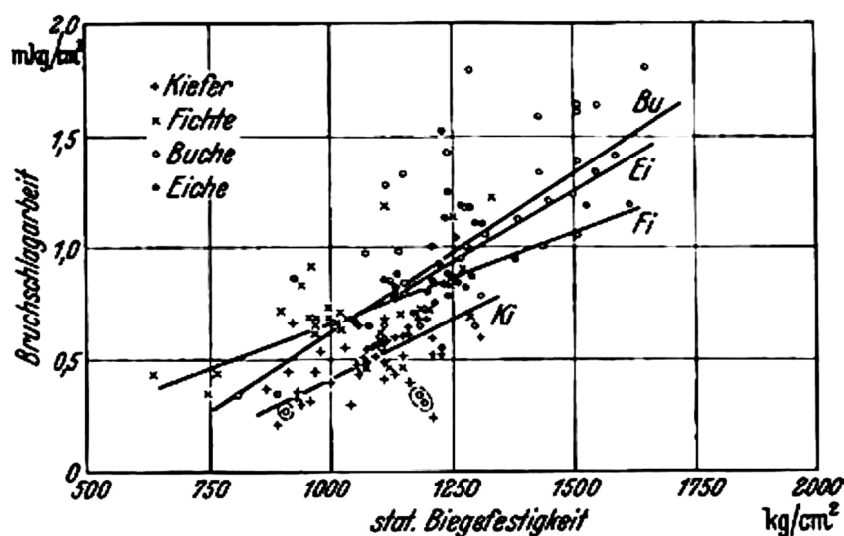


Abbildung 2.27: „Beziehung zwischen statischer Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit“ [Ghelmeziu 1938], Abbildung 26

„Der 'gesamte lebendige Widerstand', statisch gemessen, ist nach Monnin ein Integralwert aller mechanischen Eigenschaften und bei gleichen Probestababmessungen sowie gleicher Abrundung der Auflager und der Hammerschneide gleich der Schlagbiegearbeit.“ [Ghelmeziu 1938]. Diese Ansicht wird aber von [Ghelmeziu 1938], unter Hinweis auf die Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, berechtigter Weise eingeschränkt, wie auch [Kollmann 1951], S. 824 bekräftigt. Dennoch lässt sich aus [Schwab & Gyamfi 1985] folgern, dass die Werte der spezifischen Schlag- und der spezifischen Biegearbeit betragsmäßig sehr nah beieinander liegen und sich auch die Streubereiche nach oben und unten relativ symmetrisch zur Ausgleichsgeraden zeigen (vgl. Abbildung 2.28).

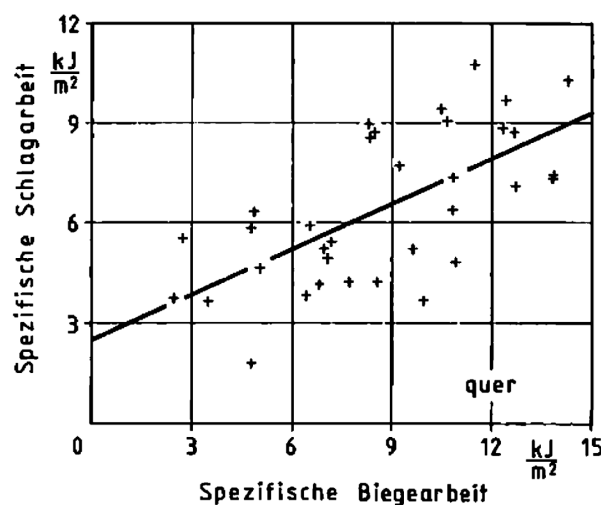


Abbildung 2.28: „Zusammenhang zwischen der spezifischen Biegearbeit und der spezifischen Schlagarbeit quer zur Faserrichtung der Deckfurniere bei Furniersperrholz“ [Schwab & Gyamfi 1985], Abbildung 4

Zieht man die großen Variationskoeffizienten der Schlagarbeit in Betracht, sowie den Fakt, dass beides (Schlag- und Biegearbeit) nie an ein und derselben Probe gemessen werden kann, ergibt sich ein Bild der relativen Übereinstimmung. Es bleibt festzustellen, dass sich die Bruchcharakteristik zwischen statischer und dynamischer Belastung doch wesentlich unterscheiden kann, da die ermittelten Arbeitswerte kumulative Größen sind (vgl. Abbildung 2.12 , S. 37).

2.8.4 Aspektverhältnisse und Probengröße

In Abbildung 2.29 ist die Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit vom Schlankheitsgrad λ der Probekörper (vgl. Gleichung 2.1 & Gleichung 3.3) verschiedener Hölzer angegeben. Diese weisen im Bereich von $\lambda \approx 12 - 15$ ein Minimum auf. [Ghelmeziu 1938] gibt „nach Monnin^{1, 2} einen Kleinstwert (der Bruchschlagarbeit; Anm. d. A.) bei $l = 12 h$.“ an.

$$\lambda = \frac{l}{h}$$

Gleichung 2.1

Es zeigt sich offensichtlich eine Wechselwirkung zwischen erreichter Schlagarbeit und Geometrie des Versuchsaufbaus (Stützweite und Schlankheitsgrad der Probe). Bemerkenswert ist jedoch, dass [Ghelmeziu 1938] in seinen Arbeiten auch Schichtholz untersucht, dieses aber ein zum Vollholz völlig verschiedenes Verhalten in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades zeigt. Dieses zeigt kein Minimum im Bereich $\lambda \approx 12 - 15$, sondern die Bruchschlagarbeit steigt linear mit zunehmendem Schlankheitsgrad an. Ein ähnliches Verhalten wird auch für Faserplatten festgestellt (vgl. auch [Kollmann 1951], Abbildung 742, S. 832). Eine Erklärung für das abweichende Verhalten der Hölzer gegenüber den Holzwerkstoffen bei kleinem Schlankheitsgrad wird in der Literatur jedoch nicht gegeben.

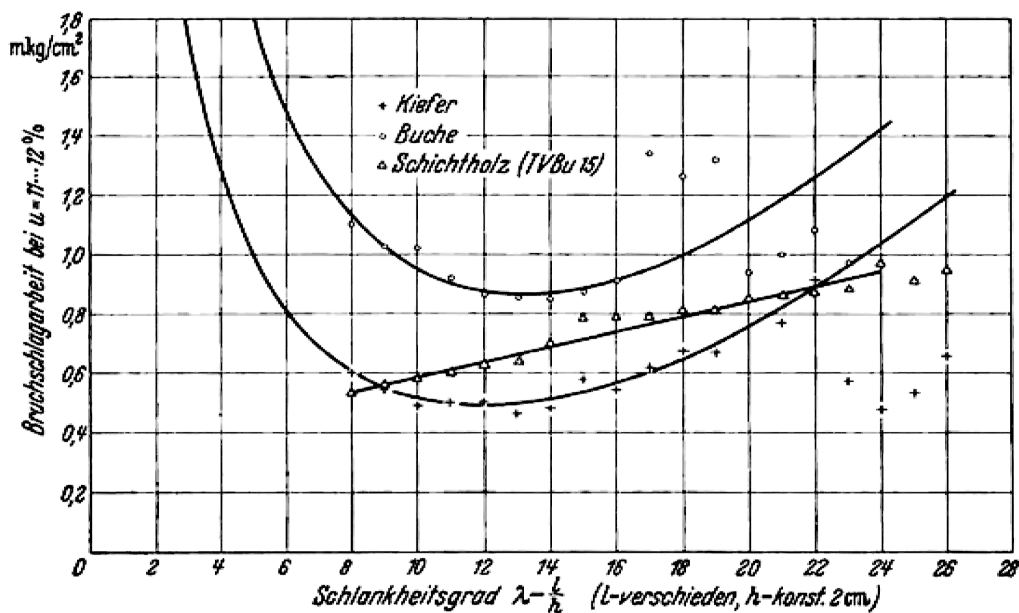


Abbildung 2.29: „Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit vom Schlankheitsgrad (Querschnitt gleichbleibend, Stützweite verschieden)“ [Ghelmeziu 1938], Abbildung 4

2.8.5 Kerbwirkung

Als wesentliches Element der Schlagprüfung ist die Einbringung von Kerben, zur gezielten Erzeugung versprödet wirkender Spannungskonzentrationen (vgl. Kapitel 2.4.3, S. 38), bekannt. Als ein mögliches Maß für die Fähigkeit eines Werkstoffes diese Spannungskonzentrationen zu ertragen, wurde die Kerbempfindlichkeit als dimensionslose Kennzahl eingeführt (vgl. Gleichung 2.2).¹⁶

[Kollmann 1951], S. 860

$$KZ = \frac{\text{Schlagbiegefestigkeit des ungekerbten Stabes}}{\text{Schlagbiegefestigkeit des gekerbten Stabes}}$$

Gleichung 2.2

¹⁶ Ein ähnliches Konzept existiert für die Dimensionierung von Wellen mit dem Kerbwirkungsfaktor (vgl. [DIN 743-2]).

Kollmann macht verschiedentlich auf Einflüsse der Kerbwirkung bei Holz aufmerksam. „Dieser Festigkeitsverlust (gemeint ist der durch Kerben verursachte Festigkeitsverlust im Zugversuch, Anm. d. A.) ist nach den bisher vorliegenden Versuchsergebnissen bei lamellierten Hölzern erheblich größer als bei Vollhölzern. Da lamellierte Hölzer hauptsächlich für hohe Beanspruchungen (im Flugzeug-, Fahrzeug- und Maschinenbau) in Frage kommen, ist diese Feststellung praktisch für den Konstrukteur von Bedeutung.“ [Kollmann 1952]. „Die Kerbformen erwiesen sich als belanglos. Die Kerbtiefe hatte bei Schichtholz und Preßschichtholz, wenn Außenkerben vorlagen, einen erheblichen Einfluß auf die Bruchspannung (im Zugversuch, Anm. d. A.).“ [Kollmann 1967], S. 23.

Tabelle 2.7: „Dynamische Festigkeitseigenschaften von Preßlagenhölzern.“ [Kollmann 1951], Tabelle 175, S. 857

Art des Preßlagenholzes	Preßschichtholz Klasse A		Preßspertholz Klasse B		Preßsternholz Klasse C	
	Schicht	⊥ Schicht	Schicht	⊥ Schicht	Schicht	⊥ Schicht
Mindestwerte nach DIN E 7707						
Bruchschlagarbeit $\rho > 1,25$	40 (3,92)*	50 (4,91)	25 (2,45)	35 (3,43)	22 (2,16)	28 (2,75)
Kerbzähigkeit $\rho > 1,25$	30 (2,94)	40 (3,92)	20 (1,96)	30 (2,94)	15 (1,47)	25 (2,45)
Bruchschlagarbeit $1,1 < \rho < 1,25$	30 (2,94)	40 (3,92)	20 (1,96)	25 (2,45)	15 (1,47)	20 (1,96)
Kerbzähigkeit $1,1 < \rho < 1,25$	25 (2,45)	35 (3,43)	15 (1,47)	18 (1,77)	12 (1,18)	15 (1,47)
	PSCH Lignofol L		PSP Lignofol L 90		PSN Lignofol Z	
Bruchschlagarbeit $\rho = 1,4$	68,9 (6,76)	87,3 (8,56)	25,5 (2,50)	45 (4,41)	25 (2,45)	50,9 (4,99)
Kerbzähigkeit $\rho = 1,4$	64,1 (6,29)	81,2 (7,97)	20,7 (2,03)	44 (4,32)	22,9 (2,25)	50,5 (4,95)
	PSCH Lignostone BN		PSP Lignostone BF II/7		PSN Lignostone BF IV/2	
Kerbzähigkeit	84,9 (8,33)	102,2 (10,03)	28,8 (2,83)	20 (1,96)	23,1 (2,27)	52,1 (5,11)
	PSCH OBO BZ		PSP OBO N		PSN OBO Z	
Bruchschlagarbeit	45 (4,41)	60 (5,89)	18 (1,77)	30 (2,94)	18 (1,77)	33 (3,24)
Kerbzähigkeit	40 (3,92)	50 (4,91)	10 (0,98)	26 (2,55)	10 (0,98)	28 (2,75)

* Werte für Bruchschlagarbeit und Kerbzähigkeit in kgcm/cm^2 (J/cm^2)

Ein anderes Bild wird in einer früheren Veröffentlichung für Schlagbelastungen skizziert. „Eine besondere Probeform, nämlich eingekerbt, wird in England für das Izod-Gerät verwendet (genormt für Flugzeugholzprüfung). Die von Küch mit Buchenvollholz und -schichtholz durchgeführten Versuche ergaben eine Minderung der Bruchschlagarbeit von 10 % durch die Kerbwirkung. Ein Einfluß der Kerbtiefe - die 0,1 ... 0,33 der Stabhöhe betrug - auf die Arbeitsaufnahme wurde nicht festgestellt.“ [Ghelmeziu 1938]. Bei [Kollmann 1951] werden konkrete Werte für die Reduzierung der Bruchschlagzähigkeit bei Vorhandensein von Kerben in Presslagenhölzern angegeben (vgl. Tabelle 2.7). Es zeigt sich also, dass ein teils deutlicher Einfluss von Kerben auf die Schlagarbeit von verdichteten Holzwerkstoffen vorhanden ist. Ebenso zeigt sich bei [Kollmann 1951] im Gegensatz zu [Ghelmeziu 1938] (s. o.) ein deutlicher Einfluss der Kerbtiefe auf die Kerbzähigkeit (vgl. Abbildung 2.30). Zusammenfassend lässt sich so ein widersprüchliches Bild der Kerbwirkung beim Schlagversuch an Holz (-werkstoffen) zeichnen.

Einerseits hat das bloße Vorhandensein von Kerben eine Auswirkung auf die Schlagarbeit. Über Art und Ausprägung der resultierenden Verminderung der Schlagarbeit besteht aber keine eindeutige Aussage.

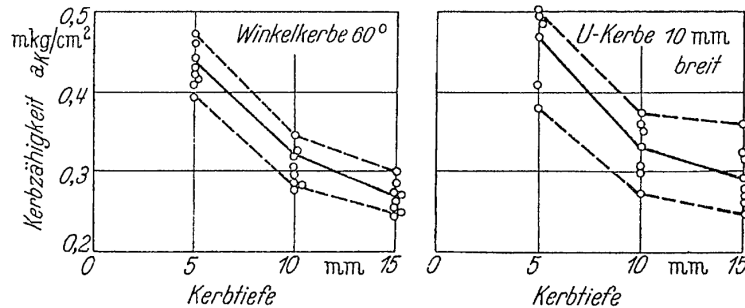


Abbildung 2.30: „Abhängigkeit der Kerbzähigkeit von der Kerbtiefe bei Kiefernholz. (Nach W. Rein.)“ [Kollmann 1951], Abbildung 775, S. 861

2.8.6 Optisches Erscheinungsbild der Bruchflächen

Das Bruchbild, das sich bei Schlagversuchen einstellt, wurde schon frühzeitig als Indiz für die Zähigkeit eines Holzwerkstoffes erkannt. Auf jeden Fall sind die Faserigkeit des Holzes sowie die Schlagrichtung, aber auch der Zustand des Holzes von Einfluss auf die Ausbildung charakteristischer Bruchbilder. Die Größe der Bruchfläche wird der verbrauchten Energie und somit der Bruchschlagarbeit gleichgesetzt. „Hier [bei der Schlagbiegearbeit Anm. d. A.] sind glatte oder treppenförmige Brüche immer und ein eindeutiger Beweis für eine hohe Sprödigkeit. d. h. eine niedrige Bruchschlagarbeit. Mittelfaserige Brüche zeigen, daß die Eigenschaften des Holzes normal sind, also etwa in der Mitte zwischen der Sprödigkeit und der Zähigkeit liegen. Bei besonders zähen Holzproben treten lange Spaltbrüche auf; gelegentlich kommt es nicht einmal zu einer völligen Trennung des Prüfstabs.“ [Kollmann 1967], S. 32. Dass dies tatsächlich auch so ist, zeigt sich bei in Abbildung 2.31 und Abbildung 2.32.

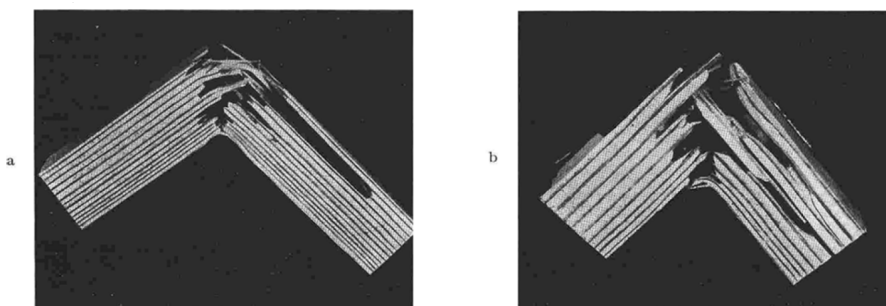


Abbildung 2.31: „Langplattige Brüche bei Lärchenkernholz, a) Darrgewicht $0,67 \text{ g/cm}^3$, Jahrringbreite $1,49 \text{ mm}$, Spätholzanteil $33,9 \%$. Schlagfestigkeit: $0,81 \text{ mkg/cm}^2$ ($u = 15 \dots 17 \%$), Druckfestigkeit: 1338 kg/cm^2 (darrtrocken). b) Darrgewicht $0,60 \text{ g/cm}^3$, Jahrringbreite $2,33 \text{ mm}$, Spätholzanteil $34,4 \%$, Schlagfestigkeit: $0,57 \text{ mkg/cm}^2$ ($u = 15 \dots 17 \%$), Druckfestigkeit: 1188 kg/cm^2 (darrtrocken).“ [Schönbach 1939], Abbildung 11

Versuche von der Bruchausprägung selbst auf die Schlagzähigkeit rückzuschließen sind nicht bekannt. Es zeigte sich aber bei [Xie et al. 2013], dass chemisch-thermische Vergütung einen bedeutenden Einfluss auf die Bruchausprägung besitzen kann (vgl. Abbildung 2.33).

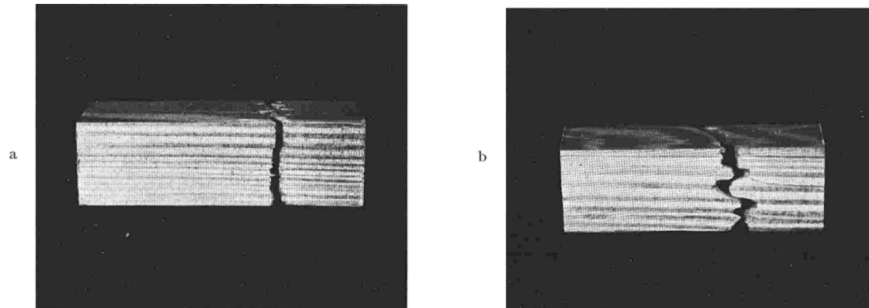


Abbildung 2.32: „Ungünstige glatte Brüche bei Lärchenkernholz. a) Darrgewicht $0,56 \text{ g/cm}^3$, Jahrringbreite $1,72 \text{ mm}$, Spätholzanteil $46,0 \%$, Schlagfestigkeit: $0,35 \text{ mkg/cm}^2$ ($u=15\ldots17 \%$), Druckfestigkeit: 971 kg/cm^2 (darrtrocken), b) Darrgewicht $0,57 \text{ g/cm}^3$, Jahrringbreite $1,96 \text{ mm}$, Spätholzanteil $45,6 \%$, Schlagfestigkeit: $0,21 \text{ mkg/cm}^2$ ($u=15\ldots17 \%$), Druckfestigkeit 1005 kg/cm^2 (darrtrocken).“ [Schönbach 1939], Abbildung 12

Ein wesentlicher Punkt die Bruchausprägung betreffend, ist die Splitttrigkeit oder Scharfkantigkeit der beim Bruch entstehenden Trennflächen. Ist davon auszugehen, dass der Bruch eines sicherheitsrelevanten Bauteils einen Unfall nach sich zieht, besteht bei ungünstig scharfen Bruchflächen ein erhöhtes Gefährdungspotenzial. Einerseits ist eine große Bruchlänge Indiz für eine hohe Zähigkeit, andererseits ist diese Bruchausprägung ungünstig in Bezug auf Verletzungen von an Unfällen beteiligten Personen zu bewerten.

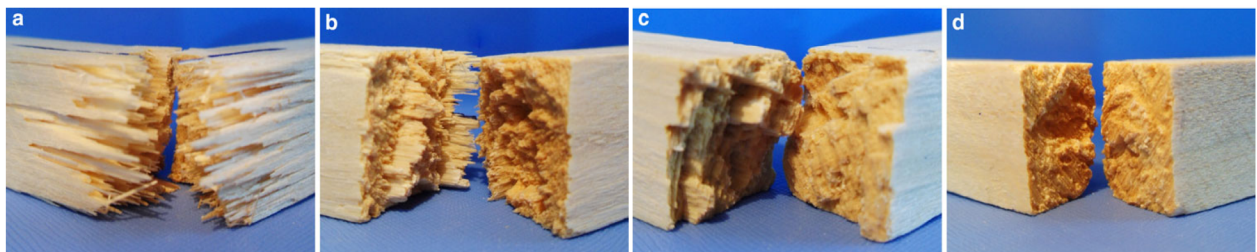


Abbildung 2.33: „Bruchbild beim Schlagbiegeversuch von (a) unbehandeltem Holz sowie mit (b) 0,4, (c) 1,2 und (d) 2,0 mol l⁻¹ DMDHEU behandeltem Holz. Die Magnesiumchloridkonzentration (Katalysator) betrug bei allen Behandlungen 1,5 Gewichts %“ [Xie et al. 2013], Abbildung 4

2.9 Stand der Technik und Konkretisierung der Aufgabenstellung

Es wird deutlich, dass die in Schlagversuchen ermittelten Kennwerte stets durch hohe Streuungen relativiert werden. Es lassen sich zwar Trends bezüglich bestimmter Einflussgrößen ableiten, doch mit statistischer Sicherheit können mittlere Veränderung infolge dieser Einflussgrößen nicht angegeben werden. Die hohe Variabilität der Werte für Vollholz kann noch mit den

verhältnismäßig kleinen Proben und somit in der starken Auswirkung von wuchsbedingten Fehlstellen erklärt werden. Dies gilt für Holzwerkstoffe mit zunehmenden Homogenisierungsgrad nicht mehr. Weiterhin muss festgestellt werden, dass die vorhandenen Änderungen der Schlagzähigkeit unter verschiedenen Einflussgrößen meist mit dem Kennwert der Bruchschlagarbeit ermittelt wurden. Da dieser aber ein kumulativer Wert ist, kann er bei völlig verschiedener Bruchcharakteristik den selben Zahlenwert annehmen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass den erkennbaren Änderungen der Bruchschlagarbeit noch deutlichere Änderungen der Bruchcharakteristik zugrunde liegen, diese aber infolge der Kumulation der Brucharbeit verdeckt werden. Hinsichtlich der Einflussgrößen Temperatur und Feuchtegehalt zeigt sich, dass eine Wärmebehandlung unter 100 °C kaum Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften besitzt. Untersuchungen für Holzwerkstoffe fehlen weitgehend. Es kann keine gesicherte Aussage darüber getroffen werden, ob aufgrund der eingebrachten Klebstoffe nicht doch ein ungünstiges Verhalten gegenüber hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten auftritt. Eine Lücke besteht ebenso bei der Kenntnis von in Produktionsstätten auftretenden Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Werte für Verhältnisse zwischen statischen und Schlagbiegeversuchen bzw. Ansätze für vereinfachte Prüfverfahren zur Bewertung der Holzwerkstoffe unter schlagartigen Belastungen sind nicht bekannt. Generell sind Untersuchungen an aktuell verfügbaren Holzwerkstoffen hinsichtlich deren Verhalten unter schlagartiger Beanspruchung nicht verfügbar. Ebenso ist auch eine Klassifizierung der Holzwerkstoffe unter diesen Gesichtspunkten nicht vorgesehen. Sollen den Holzwerkstoffen wieder Anwendungsfelder in der Technik und hier bei sicherheitsrelevanten Bauteilen erschlossen werden, bedarf es einer wissenschaftlichen Untersuchung der angeführten Belastungen. Daraus abgeleitet werden kann die Notwendigkeit einer Klassifizierung der nur schwer überschaubaren Vielfalt der Holzwerkstoffe für die Nutzungseignung in technischen Anwendungen.

Schlagartige Belastungen, wie sie an sicherheitsrelevanten Bauteilen (z. B. der Fördertechnik) auftreten können, stellen ein wesentliches Kriterium für die Werkstoffauswahl und konstruktive Gestaltung von Bauteilen dar. Die zu untersuchenden Parameter orientieren sich am Einsatz von Maschinenteilen im konkreten Anwendungsfall. Zielstellung ist die Klärung der Frage, inwiefern sich das Werkstoffverhalten mit den für diese Anwendungen typischen Ausprägungen und Schwankungen der Umgebungs- und Anwendungsbedingungen verändert. Dazu werden vergleichend statische Biegeversuche und Schlagbiegeversuche an ausgewählten Holzwerkstoffen durchgeführt. Die Verfahren zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens unter schlagartigen Belastungen und somit bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten sind in den betreffenden Normen geklärt (vgl. Kapitel 2.6.2, S. 42). Aktuelle normative Grundlagen im europäischen Rahmen existieren für den Bereich der Holzwerkstoffe hingegen nicht. Aufgabe ist es, ein **instrumentiertes Verfahren zur Schlagprüfung von Holzwerkstoffen** zu entwickeln, das deren Charakterisierung, über rein kumulative Energiegrößen hinaus, erlaubt. Mit diesem soll es möglich werden, spezifische Kennwerte zur Differenzierung der verschiedenen Werkstoffe und deren Charakteristik zu ermitteln. Das instrumentierte Verfahren soll zudem den **Vergleich mit**

statischen Versuchen ermöglichen. Diese statischen Biegeversuche, durchgeführt unter identischen Versuchsbedingungen, dienen der Ermittlung des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Bruchgeschehen. Weiterhin sind die skizzierten Szenarien der Einsatzbedingungen in der Produktion in Versuchsparametern abzubilden. Hierzu ist zunächst zu klären, welche Schwankungen der **Umgebungsbedingungen Temperatur und Luftfeuchtigkeit** in der Praxis tatsächlich auftreten. Es sind Szenarien für die **thermische Schädigung** zu entwerfen und es gilt eine konstruktionstechnisch relevante **Kerbgeometrie** abzuleiten. Davon ausgehend sind Versuche notwendig, die geeignet sind das Materialverhalten unter diesen Bedingungen zu prüfen. Zur Beschreibung des Bruchverhaltens sind durch Analysealgorithmen **Kennwerte** zu entwickeln und diese anhand ihrer statistischen Ausprägung in **charakteristische Werte** zu überführen. Die Auswahl der zur untersuchenden Werkstoffe ist unter anwendungstechnischen Gesichtspunkten sinnvoll einzuschränken. Die Ergebnisse der Versuche sollen in die Entwicklung einer Bewertungsmethodik, mit dem Ziel eines **Klassenmodells zur Auswahl von Werkstoffen** für technische Anwendungen (vgl. Abbildung 1.2, S. 20), einfließen.

3 Einflussparameter, Material und Methoden

3.1 Klimatische Einflussparameter

3.1.1 Klimaschwankungen in Produktionsstätten

Aufgrund der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Holzwerkstoffe von Temperatur und Feuchte (vgl. Kapitel 2.8.1, S. 48), können diese als wesentliche Einflussgrößen auf das dynamisch Bruchgeschehen und somit als zu untersuchende Parameter aufgezeigt werden. Gleichzeitig ist auch davon auszugehen, dass diese Parameter in industriellen Produktionsstätten deutlichen Schwankungen unterworfen sind. Konstant klimatisierte Räume werden hauptsächlich für Präzisionsbearbeitung oder Messtechnik, in der Lebensmittelindustrie oder der chemischen Industrie eingerichtet. Produktionsstätten, die keine prozesstechnischen Anforderungen an ein eng einzuhaltendes Klimaregime stellen, sind in der deutlichen Überzahl. Bei den Bereichen, in denen verbreitet Fördertechnik eingesetzt wird, handelt es sich häufig um Montage- oder Verarbeitungstrecken. Hier ist der Mensch in der Produktion das Maß für die einzuhaltenden Bereiche der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Einen Anhaltspunkt, um die klimatischen Schwankungen in Produktionsstätten über den Jahresverlauf hin zu ermitteln, bilden Langzeitmessungen der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur (vgl. Abbildung 3.1) am Aufstellort einer prototypischen Fördereinrichtung bei der Volkswagen AG im Werk Wolfsburg (vgl. Abbildung 1.2, S. 20). Die gemessenen Werte wurden im Abstand von fünf Minuten im Zeitraum März 2013 bis Januar 2014 aufgenommen. Die Feuchte- und Temperaturschwankungen der Bauteile treten infolge der Schwankung der Umgebungsbedingungen auf. Eine Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte infolge eines Kontakts mit flüssigem Wasser kann weitgehend ausgeschlossen werden. Der Feuchtegehalt der Bauteile ändert sich mit der Zeit infolge der Aufnahme von Wasser aus den umgebenden Luftschichten (vgl. Kapitel 2.3.3, S. 33). Ebenso ändert sich die Temperatur der Bauteile infolge von Wärmeübertragung aus den umgebenden Luftschichten und Wärmeleitung im Bauteil oder in der Maschine selbst. Beide Vorgänge (Wärmeübertragung und Diffusion) und damit auch die sich im Bauteil einstellenden klimatischen Bedingungen sind von Expositionsdauer, Gradient, Werkstoff- und Bauteileigenschaften abhängig. Eine analytisch geschlossene Beschreibung dieser Vorgänge ist aufgrund der vielfältigen Einflussmöglichkeiten nicht beherrschbar. Beispiele für empirische Näherungsgleichungen der Ausgleichsfeuchte bei Bauteilen werden in [Kießl & Möller 1989] gegeben. Ebenso wird in [Wood Handbook 2010], S. 4-3 eine Gleichung für die Berechnung der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen angegeben, ohne jedoch eine Differenzierung verschiedener Holzarten oder Holzwerkstoffe zu geben. Die angegebenen Lösungen zur Berechnung der Ausgleichsfeuchte berücksichtigen nicht explizit die Expositionsdauer. Vielmehr wird von einer ausreichend langen Zeitdauer ausgegangen, in der der Ausgleichszustand erreicht wird. Dies resultiert aus der labormäßigen Beschreibung der Eigenschaften. In der praktischen Anwendung herrschen jedoch sich ständig dynamisch ändernde klimatische Bedingungen vor. Die sich einstellende Temperatur ϑ_B und Ausgleichsfeuchte u_B des Bauteils ist eine Funktion der Expositionsdauer T_{exp} und des umgebenden Klimas (Umgebungstemperatur ϑ_U und relativer Luftfeuchtigkeit φ_U). Die Bauteilzustände ändern sich so relativ zum Umgebungsklima (vgl. Gleichung 3.1).

$$(u_B, \vartheta_B) = f(\vartheta_U, \varphi_U, T_{\text{exp}}, \dots) \quad \text{Gleichung 3.1}$$

Diese Änderung findet jedoch nicht plötzlich statt. Die Bauteilzustände¹⁷ ändern sich zeitverzögert als Folge der Diffusionsgeschwindigkeit bzw. des Diffusionswiderstandes und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs. Je höher diese sind und je größer das Bauteil ist, desto länger dauert es bis der Ausgleichszustand erreicht wird. Aufgrund der variierenden Diffusionswiderstände und Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Hölzer und Holzwerkstoffe (vgl. Kapitel 2.3.3, S. 33) sowie der unterschiedlichen Bauteilabmessungen ist es a priori nicht möglich die genannten Verzögerung zu bestimmen. Es kann aus Erfahrung¹⁸ lediglich angenommen werden, dass diese im Bereich von 24 h bis wenigen Tagen liegt. Um dennoch die zeitliche Verzögerung zu berücksichtigen, werden die Messwerte (relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur) fortlaufend mit einem festgelegten Zeitfenster T_W gemittelt (vgl. Abbildung 3.1). Zu jedem Zeitpunkt t_i der Messung werden die Werte über den Bereich $t_i - T_W/2$ bis $t_i + T_W/2$ gemittelt¹⁹.

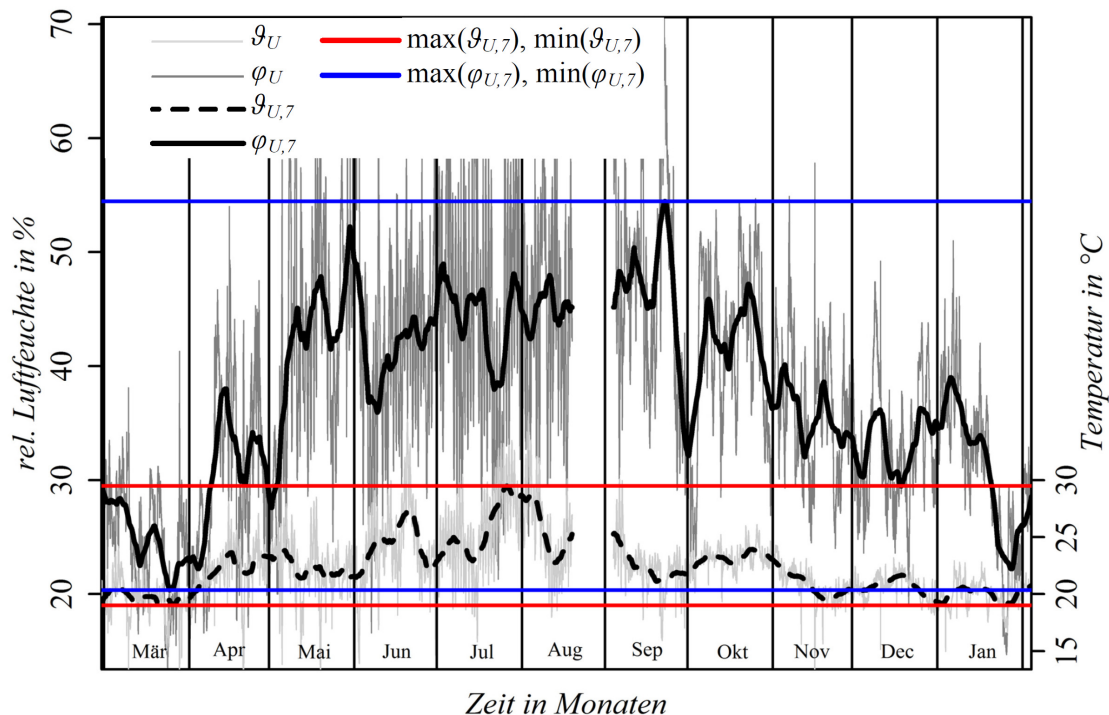


Abbildung 3.1: Temperatur und relative Luftfeuchte in einer Produktionsstätte der Volkswagen AG über den Jahresverlauf. Durch ein Glättungsintervall mit Zeitfenster von 7 Tagen gefilterte Verläufe, horizontal: Extrema des gefilterten Verlaufes für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

¹⁷ Bei variierenden Umgebungsklima herrscht stets ein Temperatur- und Feuchtefeld mit Gradienten größer Null im Bauteil vor. Vereinfachend wird in der Arbeit von einem über diese Felder gemittelten Zustand ausgegangen.

¹⁸ Eigene Erfahrungen aus der Klimatisierung von Werkstoffproben für Versuchszwecke.

¹⁹ Hierzu wird ein Moving Average Filter angewendet (vgl. Kapitel 3.9, S. 108).

Die Extremwerte von Luftfeuchtigkeit $\varphi_{E,W}$ und Temperatur $\vartheta_{E,W}$ für das jeweilige Zeitfenster²⁰ geben einen Bereich der klimatischen Bedingungen über den Jahresverlauf an. Eine Variationsrechnung der Zeitfenstergröße zeigt die Abhängigkeit der Lage und Bandbreite der klimatischen Bedingungen (vgl. Abbildung 3.2). Es wird deutlich, dass gerade die auftretenden minimalen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit von $\sim 15\%$ bis $\sim 20\%$ deutlich unter den Werten des Normklimas ($\varphi_U = 65 \pm 5\%$ und $\vartheta_U = 20 \pm 2\text{ °C}$ nach [DIN EN 310], vgl. auch Kapitel 3.3, S. 76) zur Werkstoffprüfung liegen. Die Maximalwerte der gemittelten relativen Luftfeuchtigkeit liegen bis zu einem Zeitfenster von drei Tagen im Bereich des Normklimas. Die Extremwerte der Temperatur liegen näher am Bereich des Normklimas, überschreiten diesen aber auch.

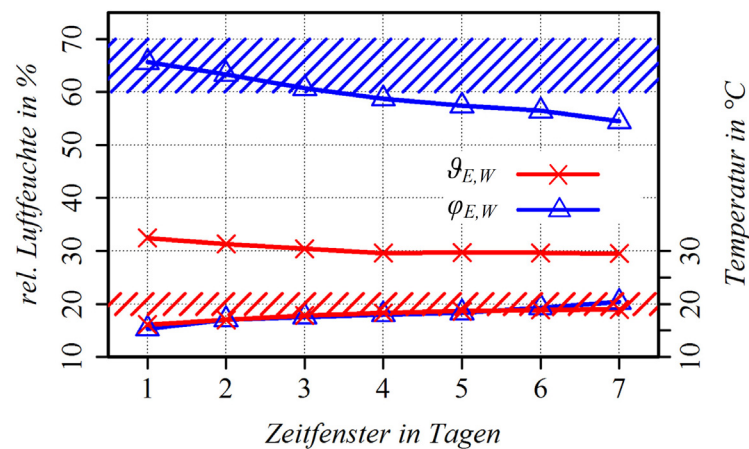


Abbildung 3.2: Maximal- und Minimalwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit des zur Glättung genutzten Zeitfensters, schraffierte Bereiche entsprechen dem Normklima

Bis zu dieser Stelle ist noch nicht geklärt, zu welchen Zeitpunkten die Klimaextreme auftreten bzw. ob die Extrema von Feuchte und Temperatur zum gleichen Zeitpunkt auftreten. Zu diesem Zweck können Temperatur und Luftfeuchtigkeit in einer Art Phasendiagramm (in verschiedenen zeitlichen Glättungen) gegeneinander dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.3). Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass Temperatur und Feuchte nicht streng miteinander korrelieren. Vielmehr lassen sich drei charakteristische Extrema $P(\vartheta_{E1,W} \dots \vartheta_{E3,W}, \varphi_{E1,W} \dots \varphi_{E3,W})$ zeigen (vgl. Tabelle 3.1). Deren Lage spannt einen Bereich auf, in dem sich die Klimaschwankungen nahezu vollständig bewegen.

Tabelle 3.1: Charakteristische Extrema der Klimabedingungen

		Charakteristische Extrema $P(\vartheta_{Ei,W}, \varphi_{Ei,W}), i = 1,2,3, W = 1,3,5,7$							
Zustandsbeschreibung	i	$\vartheta_{Ei,1}$	$\varphi_{Ei,1}$	$\vartheta_{Ei,3}$	$\varphi_{Ei,3}$	$\vartheta_{Ei,5}$	$\varphi_{Ei,5}$	$\vartheta_{Ei,7}$	$\varphi_{Ei,7}$
trocken / kalt	1	16,6 °C	15,3 %	18,2 °C	17,6 %	19,2 °C	18,4 %	19,4 °C	20,4 %
nahe Normklima	2	19,6 °C	65,6 %	19,9 °C	60,1 %	20,7 °C	47,4 %	21,3 °C	54,5 %
mäßig feucht / warm	3	32,4 °C	33,9 %	30,4 °C	39,4 %	29,7 °C	43,9 %	29,5 °C	42,9 %

²⁰ Diese Zeit steht theoretisch zur Klimatisierung des Bauteils im gemitteltem Klima zur Verfügung.

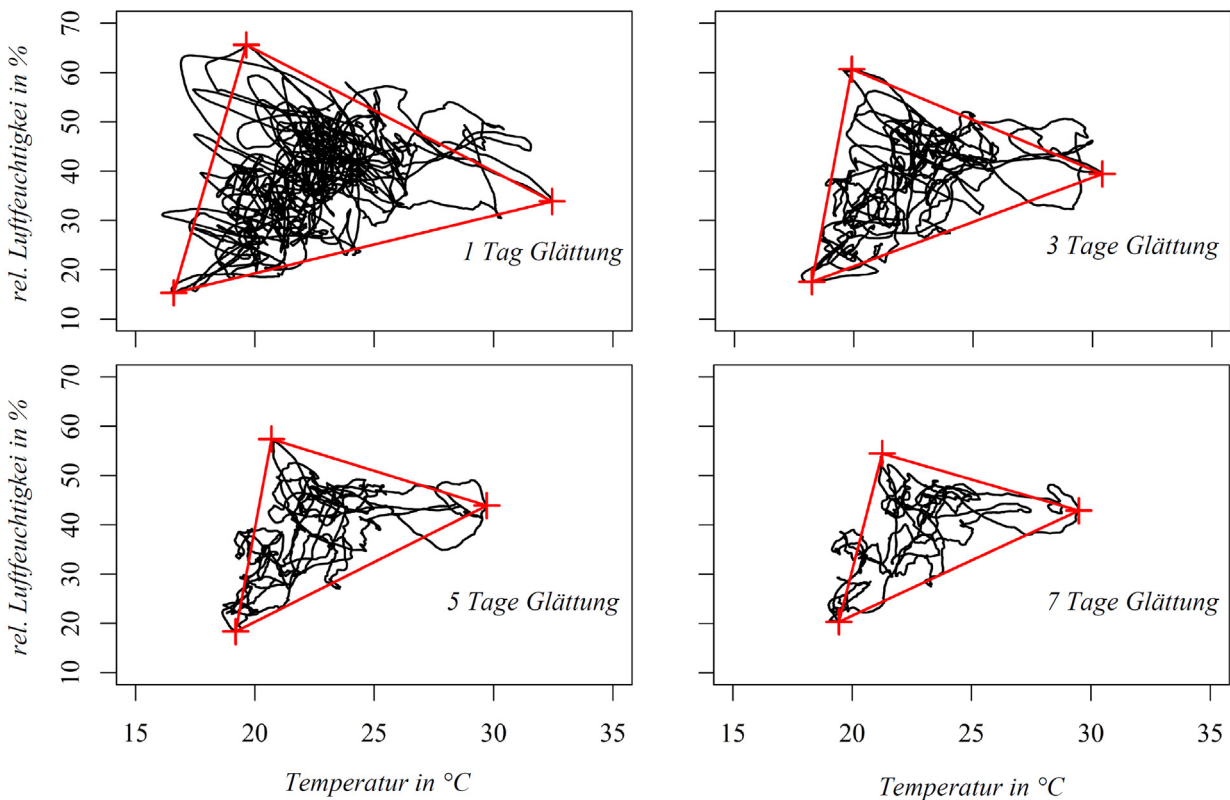


Abbildung 3.3: Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über dem zeitlichen Verlauf der Temperatur aufgetragen für verschieden lange Zeitfenster des Glättungsintervalls T_W (1, 3, 5 und 7 Tage)

Aus diesen Bereichen lassen sich vom Normklima abweichende aber technisch relevante Klimate ableiten. In Summe zeigt sich ein eher mäßig warmes und trockenes Klima im Vergleich zum Normklima. Es ergeben sich drei markante klimatische Zustände: i) trocken / kalt, ii) nahe am Normklima und iii) warm / mäßig feucht (vgl. Tabelle 3.1 und Abbildung 3.3). Unter Berücksichtigung der in den Kapiteln 2.3.3, S. 33 und 2.8.1, S. 48 angegebenen Auswirkungen klimatischer Bedingungen auf die Eigenschaften der Hölzer und Holzwerkstoffe²¹, muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund der dargestellten Schwankungen des Umgebungsklimas zumindest im Zustand trocken / kalt relevante Variationen der Werkstoffeigenschaften auftreten können. Im Klimaregime warm / mäßig feucht hingegen sind kaum Veränderungen der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Normklima zu erwarten²². Als kritisch erscheint so, bei milden klimatischen Schwankungen, besonders der trocken / kalte Werkstoffzustand. Diesen gilt es in Versuchen zur Schlagempfindlichkeit zu prüfen. Die Einstellwerte für die Klimatisierung (17 °C und 15 %) der zu prüfenden Werkstoffproben leiten sich aus den Extremwerten der Klimabereich für ein Zeitfenster von 24 h ab (vgl. Abbildung 3.2).

21 Nach Abbildung 2.10, S. 34 ergibt sich für $\varphi_U \sim 20\%$ und $\vartheta_U \sim 20\text{ °C}$ eine ungefähre Ausgleichsfeuchte von 4 %. In Abbildung 2.21 bis Abbildung 2.23 zeigen sich deutliche Streungen und Veränderungen der Schlagzähigkeit im Bereich kleiner 10 % Ausgleichsfeuchte der Werkstoffe.

22 Aus Abbildung 2.10, S. 34 ergibt sich für $\varphi_U \sim 40\%$ und $\vartheta_U \sim 30\text{ °C}$ eine Ausgleichsfeuchte von ca. 8 %.

Dieses kurze Zeitfenster wird gewählt, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass in ungünstigen Fällen kleine Bauteile mit offenen Schnittkanten relativ schnell ein Ausgleichsklima annehmen. Zudem sind gerade bei Biegebelastungen die Zustände der Randbereiche (welche in kurzem Zeiträumen klimatisch reagieren) bedeutend. Für größere Bauteile sind eher klimatische Extremwerte, die aus längeren Zeiträumen resultieren, anzunehmen.

3.1.2 Thermische Schädigung

Zusätzlich, zu den genannten milden betriebsbedingten Klimaschwankungen, können sich weitere klimatische Effekte auf die Eigenschaften der Holzwerkstoffe auswirken. Im industriellen Einsatz kommt es immer wieder zu ungeplanten Betriebszuständen, so auch bei den Umgebungsbedingungen (vgl. skizzierte Szenarien in Kapitel 2.8.2, S. 52). Es stellt sich die Frage, ob diese ungeplanten klimatischen Zustände zur thermischen Schädigung der Holzwerkstoffe führen können und ob diese Schädigung im Nachhinein an den Werkstoffen detektierbar ist, sich also nachhaltig und merklich auf die Werkstoffeigenschaften auswirkt. In Bezug auf sicherheitsrelevante Eigenschaften lässt sich hier Klärungsbedarf feststellen, besonders da thermische Belastung eines Bauteils nicht in jedem Fall registriert wird. Wie in den Grundlagen herausgearbeitet wurde, stellen sich merkliche thermische Schädigungen bei Vollhölzern erst in einem Bereich oberhalb von 100 °C ein (vgl. Kapitel 2.8.2, S. 52). Zudem ist über das Bruchschlagverhalten von Holzwerkstoffen bei Temperaturbelastung im Bereich über 100 °C kaum etwas bekannt. Es bestehen Zweifel, ob sich das Temperaturverhalten von Vollholz (vgl. Abbildung 3.4) gegenüber schlagartigen Beanspruchungen direkt auf das der Holzwerkstoffe übertragen lässt. Es kann vermutet werden, dass der in den Holzwerkstoffen eingesetzte Klebstoff thermisch induzierte Festigkeitsverluste, gerade bei längerer Expositionsdauer, zeigt (vgl. Kapitel 2.3.2, S. 32).

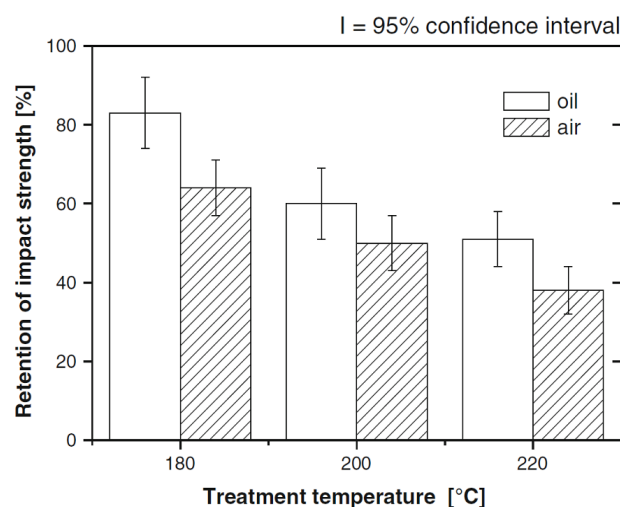


Abbildung 3.4: „Einfluss der Temperatur und des Schutzmediums auf die Schlagbiegefestigkeit von Holz. Daten von Rapp and Sailer (2000)“ [Xie et al. 2013], Abbildung 2

Für die durchzuführenden Versuche kann so abgeleitet werden, dass Proben untersucht werden müssen, die eine thermische Schädigung von über 100 °C erfahren haben. In Anlehnung an die Literatur (vgl. Kapitel 2.8.2, S. 52) werden Temperaturstufen von 105 °C und 200 °C festgelegt. Eine darüber hinausgehende Erwärmung wurde aufgrund der fortschreitenden thermischen Zersetzung von vornherein ausgeschlossen. Besonders bei dem mit PMDI gebundenem OSB-03 ist eine höhere Temperatur kritisch, da bei Temperaturen von über 200 °C Isocyanate freigesetzt werden können [Köhler 2011]. Es zeigten sich bei ersten Heizversuchen der Temperaturstufe 200 °C dennoch bereits nach 2 h starke Zersetzungserscheinung. Diese stellten sich in Form von Rauchgasen und stark dunkler Färbung bei OSB-03 dar. Die ursprünglich avisierte Zeitdauer der thermischen Belastung bei dieser Temperaturstufe konnte so nicht erreicht werden. Als Ursache für die Rauchgasentwicklung wird, aufgrund der stark dunklen Färbung des OSB-03, dessen höhere Reaktivität infolge der größeren Oberfläche der Holzpartikel angenommen. Die Zersetzung des Lignins kann so schneller voranschreiten, was wiederum die starke dunkle Färbung erklärt [Topf 1971]. Die Heiztemperatur musste entsprechend nach 2 h wieder auf eine Temperatur von 100 °C zurückgefahren werden. Die Heizdauer ist bei beiden Temperaturstufen so eingestellt, dass die Proben entnommen werden, wenn der darrtrockene Zustand bei allen Proben erreicht ist (vgl. Kapitel 3.3). Diese werden nach der Erhitzung wieder im Normklima bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte reklimatisiert.

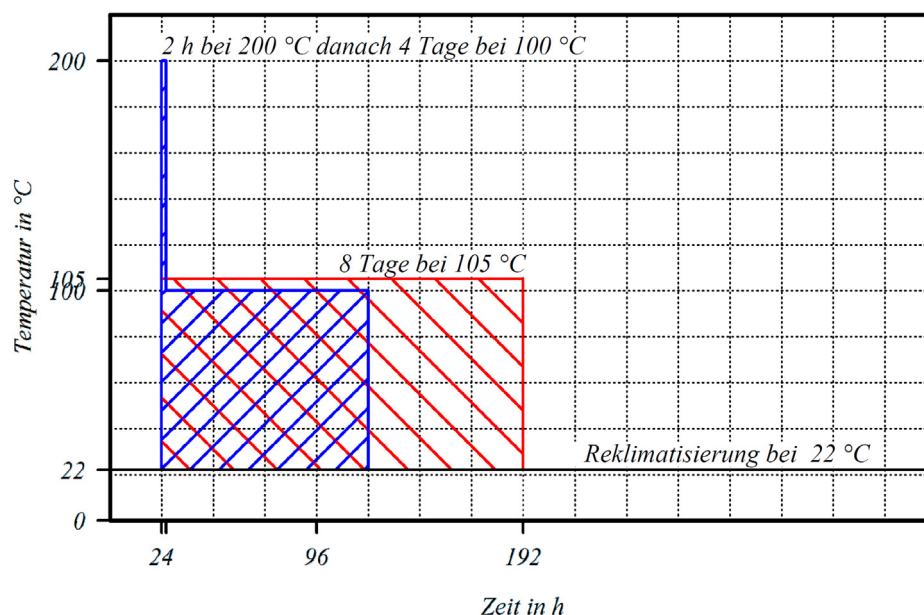


Abbildung 3.5: Temperatur-Zeit-Kurven der Warmlagerung bei 105 °C und 200 °C, im Anschluss Reklimatisierung im Normklima

3.2 Versuchsmaterial

3.2.1 Werkstoffauswahl

Der Auswahl der untersuchten Holzwerkstoffe liegt die mögliche Anwendung dieser im Maschinenbau zugrunde²³. Um eine möglichst objektive Auswahl zu erreichen, ist es notwendig eine Schwelle für die Nutzbarkeit der Werkstoffe zu definieren. Die Frage nach einem integralen Kriterium für die Nutzbarkeit von Werkstoffen im Maschinenbau ist jedoch nicht allgemeingültig zu beantworten. Häufig sind Aspekte wie mechanische Leistungsfähigkeit, technologische Eigenschaften aber auch Kosten und Verfügbarkeit ausschlaggebend. Nicht immer aber ist jede Eigenschaft in jedem Anwendungsfeld des Maschinenbaus von gleicher Bedeutung. Ein Ansatz zur Bildung einer solchen Schwelle bzw. eines solchen Kriteriums ist die Zusammenfassung von mechanischen Kennwerten wie Steifigkeiten, Festigkeiten aber auch charakteristischer Dehnungen und der Dichte des jeweiligen Werkstoffes zu einer - somit spezifischen (dichtespezifischen) - Maßzahl (γ_p). Diese bildet hier die Leichtbaueignung des Werkstoffs ab (vgl. Gleichung 3.2). Ein Beispiel für dieses Vorgehen kann [Ashby, Jones & Schepp 1986], S. 68 ff. entnommen werden. Es bleibt festzustellen, dass Leichtbau nicht in jedem Anwendungsfall von Bedeutung ist, in manchen Fällen sogar kontraproduktiv sein kann. Es lässt sich mit diesem Ansatz aber zeigen, welches Volumen an Werkstoff notwendig ist, um bestimmte Belastungen ertragen zu können. Auf dieser Basis ist ein erster Vergleich zu den klassischen Konstruktionswerkstoffen des Maschinenbaus möglich. In Kapitel 2.1, S. 25 werden bereits häufig genutzte Vertreter der Werkstoffgruppen genannt. Es ist offensichtlich, dass die Auswahl von Vergleichswerkstoffen immer subjektiv ist. Dementsprechend wird versucht, mögliche Bandbreiten der spezifischen Eigenschaften der Holzwerkstoffe darzustellen. Aus den sich ergebenden Schnittmengen, der Holzwerkstoffe mit den klassischen Werkstoffen des Maschinenbaus, lassen sich mögliche Einsatzpotenziale dieser aufzeigen. Im Umkehrschluss muss davon ausgegangen werden, dass Werkstoffe, die nicht in diese Bereiche kommen, auch keine Anwendungsmöglichkeiten im Maschinenbau besitzen bzw. deren Nutzung sehr unwahrscheinlich ist. Demzufolge finden diese Werkstoffe im Weiteren keine Berücksichtigung.

$$\gamma_p = \frac{(\sigma, E, \epsilon)}{\rho}; [\gamma_p] = \frac{(N/mm^2, N/mm^2, \%)}{kg/m^3} \quad \text{Gleichung 3.2}$$

In der entsprechenden Normung sind für die verschiedenen Holzwerkstoffklassen charakteristische Werte für die Steifigkeit und die Festigkeit sowie typische Werte der Dichte angegeben. „*Holzwerkstoffe müssen den Anforderungen von EN 13986 entsprechen.*“ [DIN EN 1995-1-1], S. 33. Diese Werte können zur Einschätzung der mechanischen Leistungsfähigkeit genutzt werden. In Abbildung 3.6 sind die Bereiche der charakteristischen Werte (5 % - Quantile,

²³ Hierzu forscht die Arbeitsgruppe des Autors. In [Müller 2012], [Eckardt 2014], [Eckardt 2013] [Eichhorn 2013] sind einige Arbeiten zu Holzwerkstoffen in technischen Anwendungen dargestellt.

Index _{5%}) für die verschiedenen Holzwerkstoffgruppen aus Tabelle 3.2 eingetragen²⁴. Da allerdings die in der Norm angegebenen charakteristische Werte als Mindestanforderungen zu verstehen sind, bleibt die obere Leistungsgrenze der Werkstoffe noch unberücksichtigt. Die in Abbildung 3.6 eingetragenen Werte aus eigenen Messungen (OSB, SWP, PLY ohne Index) sind Mittelwerte und geben so im Vergleich (zur Norm mit 5 % - Quantilen) eine weniger konservative Schätzung des Leistungsspektrums an. Sie umfassen eine ganze Reihe an handelsüblichen und labormäßig hergestellten Holzwerkstoffen. Es wurden Messungen in 0 ° - und 90 ° - Richtung²⁵ der Scheiben- und Plattenbelastung durchgeführt. Auf die Differenzierung der Platten- und Belastungsrichtung im Diagramm wird bewusst verzichtet, um einen Eindruck vom Spektrum der Eigenschaften einerseits, sowie die vergleichende Darstellung innerhalb eines Diagramms andererseits, zu ermöglichen.

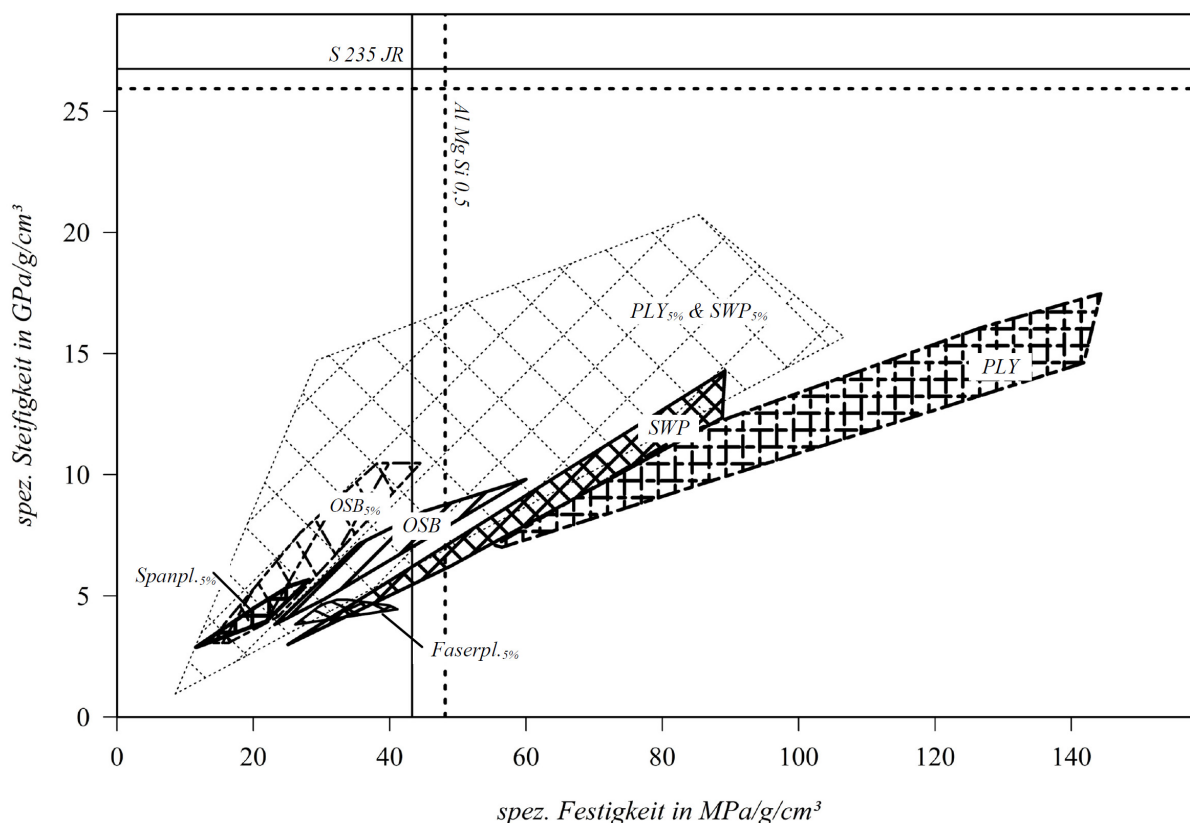


Abbildung 3.6: Bereiche der spezifischen Steifigkeit / Festigkeit für verschiedene Holzwerkstoffgruppen. Mit Index _{5%} charakteristische Werte aus DIN EN 12369-1 bis -3, ohne Index Werte eigener Messungen. Horizontal und vertikal die Werte für typische Stahl- und Aluminiumwerkstoffe.

24 Die Massivholzplatten und das Sperrholz wurden zu einer Gruppe zusammengefasst.

25 0 ° - Richtung: Vorzugsrichtung der Platte, bei Sperrholz / Schichtholz längs zur Faserrichtung der Decklage

Tabelle 3.2: Charakteristische Werte der Rohdichte, Biegefestigkeit und -steifigkeit nach DIN EN 12369-1 bis -3

Klasse	Eigenschaften						Anm.
	Norm	Rohdichte	Biegefestigkeit		Biegeelastizitätsmodul		
			Hauptachse	Nebenachse	Hauptachse	Nebenachse	
Einheiten		kg/m³	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	
Faserwerkstoffe							
MDF.LA	DIN EN 12369-1	500...650	19...21	-	2295...3145	-	I)
MDF.HLS	DIN EN 12369-1	500...650	18...22	-	2380...3145	-	I)
MBH.LA2	DIN EN 12369-1	600...650	15...17	-	2320...2480	-	I)
HB.HLA2	DIN EN 12369-1	800...900	32...37	-	3680...4000	-	I)
Spanwerkstoffe							
P4	DIN EN 12369-1	500...650	5,8...14,2	-	1440...2560	-	I)
P5	DIN EN 12369-1	500...650	7,5...15	-	1680...2800	-	I)
P6	DIN EN 12369-1	500...650	10...16,5	-	2240...3520	-	I)
P7	DIN EN 12369-1	500...650	12,5...18,3	-	2560...3680	-	I)
OSB/2 & OSB/3	DIN EN 12369-1	550	14,8...18	7,4...9	4191	1683	I)
OSB/4	DIN EN 12369-1	550	21...24,5	11,4...13	5763	2278	I)
Sperrholz							
E & F-Klassen	DIN EN 12369-2	350...750	3...80	-	335...11760	-	II)
Massivholzplatten							
SWP/1-3	DIN EN 12369-3	410	12...35	5...9	6035...8500	467,5...1275	I)
I) 5 % - Quantile der Steifigkeiten entsprechend Norm berechnet, verschiedene Dickenbereiche							
II) 5 % - Quantile der Steifigkeiten entsprechend Norm berechnet, für unteren Wert mit Mittelwert x 0,67, für oberen Wert mit Mittelwert x 0,84							

Als Schwellenwerte eingezeichnet, markieren die spezifische Steifigkeit / Festigkeit von S 235 JR und AlMgSi 0,5 zwei mengenmäßig stark genutzte Vertreter der klassischen Metallwerkstoffe für Anwendungen ohne spezielle Anforderungen. Aus der Lage der Bereiche in Abbildung 3.6 zeigt sich, dass Faser- und Spanwerkstoffe in ihren spezifisch mechanischen Eigenschaften deutlich hinter Massivholz- und Furnierwerkstoffen zurückbleiben. Die Strandwerkstoffe liegen dazwischen und erreichen in ihren spezifischen Festigkeiten das Niveau von S 235 JR knapp, schneiden aber in Bezug auf die potenziell erreichbare spezifische Steifigkeiten schlecht im Vergleich zu Massivholz- und Furnierwerkstoffen ab. Die letztgenannte Gruppe von Werkstoffe zeigt ein deutliches Einsatzpotenzial. Mit deren spezifischen Festigkeiten werden teilweise Werte erreicht, die im Bereich hochwertiger Vergütungsstähle liegen²⁶. Die spezifischen Steifigkeiten erreichen zwar die Schwellenwerte der Metallwerkstoffe nicht, liegen aber wiederum deutliche über denen der Faser- und Spanwerkstoffe. Es kann also davon ausgegangen

26 z. B.: 42CrMo4 Wellenstahl, $R_m \sim 1.200 \text{ N/mm}^2$ entspricht bei einer Dichte von $7,85 \text{ g/cm}^3$ einer spezifischen Festigkeit von 153 Mpa/g/cm^3 ; Werte aus [Falk, Krause, Landsknecht & Tiedt 1999], S. 49 & 128

werden, dass für hochwertige Massiv- und Furnierwerkstoffe sich durchaus ein Einsatzpotenzial, und wenn nicht durch fertigungstechnologische Probleme behindert, sogar ein Substitutionspotenzial gegenüber Metallwerkstoffen im Maschinenbau ergibt. Die Auswahl des Versuchsmaterials innerhalb der Werkstoffgruppen OSB, SWP und PLY erfolgt anhand der am Markt verfügbaren typischen Plattenhalbzeuge dahingehend, dass eine möglichst große Bandbreite der Eigenschaften abgebildet werden kann. Aus der Gruppe der PLY werden verschiedene Werkstoffe ausgewählt, die sich in Holzart, Qualität, Lagenanzahl und Plattendicke unterscheiden. Ausgehend davon, dass eine ursächliche Korrelation zwischen Werkstoffdicke und den mechanischen Eigenschaften (vgl. z. B. [Kollmann 1951], S. 841 ff.), neben dem Einfluss des Plattenaufbaus, besteht, wird versucht einen möglichst breiten Dichtebereich der Holzwerkstoffe zu untersuchen. Bei den OSB und SWP Werkstoffen wird jeweils nur eine Werkstoffvariante untersucht. Die industriell hergestellten und handelsüblichen Werkstoffe bilden die zugrundeliegende Auswahlmenge. Darüber hinaus orientiert sich die Auswahl auch an Werkstoffen, die innerhalb eines Projektes²⁷ untersucht wurden. So kann die bisher bestehenden Datenbasis weiter ergänzt werden. In Tabelle 3.3 werden die ausgewählten Werkstoffe näher charakterisiert.

Tabelle 3.3: Für die durchzuführenden Versuche ausgewählte Holzwerkstoffe

		Platteneigenschaften**			
Kurzzeichen*	Art / Klassifizierung**	Verklebung	Plattenaufbau***	Dichte	Nennstärke
Strandwerkstoff					
OSB-03	OSB 3 nach EN 300	PMDI	Dichteprofil	0,64 g/cm³	18 mm
Furnierwerkstoffe					
PLY-BB	Furniersperrholz russ. / finn. Birke Schälfurniert Multiplex	BFU 100 PF	I-I-I-I // Sym	0,68 g/cm³	18 mm (13lagig)
PLY-PO	Okoumé-Furnierplatten Mittellage Pappel Qualität II/III	AW (AW 100) MUPF	I-I-I // Sym.	0,50 g/cm³	18 mm (9lagig)
PLY-ID	Industriesperrholz schälfurniert	WBP MUPF	I-I-I-I- // Sym.	0,57 g/cm³	18 mm (15lagig)
PLY-RP	Birkensperrholz "Riga Ply" EN 314 3 rd class, DIN 68705-3	BFU 100 PF	I-I-I-I- // Sym.	0,70 g/cm³	21 mm (15lagig)
PLY-KQ	Furnierschichtholz Fichte Kerto Q	AW (AW 100) PF	I-III-I	0,53 g/cm³	20 mm (7lagig)
Massivholzplatte					
SWP-3F	3-Schichtplatte Fichte Binderholz, Verleimung	AW (AW 100) MUPF	I-I	0,49 g/cm³	19 mm (3lagig)
* XXX-YY: XXX: Kategorie, YY: Bezeichnung individuell					
** Wenn verfügbar Hersteller- / Händlerangaben					
*** I = Hauptrichtung, - = Nebenrichtung					

27 FKZ 22011410 (FNR): „Entwicklung von Qualitätshalbzeugen aus Spezialholzwerkstoffen für Anwendungen im Maschinenbau und in der Fördertechnik“

3.2.2 Probenabmessungen

Die Festlegung der Probenabmessungen ist für die Schlagversuche von wesentlicher Bedeutung. Diese sind auf das elastisch-plastische Verhalten der Werkstoffe abgestimmt, so dass beim Schlag ein vollständiger Bruch auftritt. Einerseits wird bei Biegeversuchen (statisch aber auch schlagartig) durch das Aspektverhältnis von Probenlänge zu Probenhöhe ein Einfluss auf den Verlauf und die Maximalwerte der gemessenen Kräfte und Durchbiegungen ausgeübt (vgl. Kapitel 2.8.4, S. 55). Andererseits wirkt sich die Probenlänge auf die Eigenfrequenzen der Probe aus, die bei dynamischen Messvorgängen berücksichtigt werden müssen (vgl. [Krech 1960]). Einen Anhaltspunkt zur Auswahl der Probenabmessungen können die in der Normung vorhandenen Aspektverhältnisse geben (vgl. Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Größen- und Aspektverhältnisse aus den Normen der Schlagbiegeprüfung

Norm	Probeneigenschaften				
	$l_p \times b_p \times h_p^*$	l_w	λ_w	λ_p	Werkstoffbereich
DIN EN ISO 148-1	(55 x 10 x 10) mm	40 mm	4	5,5	Stahl
DIN EN ISO 179-1**	(80 x 10 x 4) mm	62 mm	6,2 (15,5)	8 (20)	Kunststoff
DIN EN ISO 179-1**	k.A.	k.A.	20	25	Kunststoff
DIN EN ISO 179-1**	k.A.	k.A.	6 (8)	11 (13)	Kunststoff
DIN 52189	(300 x 20 x 20) mm	240 mm	12	15	Holz

* mit h_p ist stets das Maß der Probe in Schlagrichtung gekennzeichnet

** in DIN EN ISO 179-1 kann sowohl breit- als auch schmalseitiger Schlag erfolgen. Es sind verschiedene Probenabmessungen bzw. Schlankheitsgrade für verschiedene Versagensarten (Werkstoffgruppen) angegeben.

Der Schlankheitsgrad λ der Probekörper definiert sich je nach Bezug auf Widerlagerabstand l_w oder Probenlänge l_p entsprechend Gleichung 3.3. Die Höhe der Probe h_p ist dabei stets das Maß des Probekörpers in Schlagrichtung. Der Schlankheitsgrad der Proben in den verschiedenen Normen reicht von $\lambda_w = 4 \dots 20$ und von $\lambda_p = 5,5 \dots 25$. Die Probenhöhe ist, zumindest bei Holzwerkstoffen, durch die verschieden dicke Plattenmaterial festgelegt. In der vorliegenden Arbeit werden Versuche mit Belastungsrichtung in Vorzugsrichtung der Platten bei Scheiben- und Plattenbelastung durchgeführt (vgl. Kapitel 2.3.1, S. 29). Um Scheiben- und Plattenbelastung vergleichen zu können, wird eine quadratische Querschnittsfläche A_q mit $h_p = b_p$ gewählt. So sind die Kantenlängen h_p des Querschnitts durch die Plattenmaterialdicke festgelegt.

$$\lambda_p = \frac{l_p}{h_p} ; \lambda_w = \frac{l_w}{h_p} ; A_q = b_p \cdot h_p \quad \text{Gleichung 3.3}$$

Da aber die Nenndicke der verschiedenen Plattenwerkstoffe variiert, wird das Verhältnis von Probenlänge zu Kantenlänge einheitlich festgelegt. Dies hat zur Folge, dass Probenlänge und Widerlagerabstand an die jeweilige Plattenmaterialdicke angepasst werden müssen und nicht, wie in [DIN 52189] vorgegeben, Fixmaße sind. Für die Festlegung des Schlankheitsgrades wird sich

jedoch an den in der vorgenannten Norm angegebenen Probenabmessungen orientiert ($l_p = 300 \text{ mm}$, $h_p = 20 \text{ mm}$, $l_w = 240 \text{ mm}$, $\lambda_p = 15$, $\lambda_w = 12$). Dies rechtfertigt sich in der Absicht, eine gewisse Vergleichbarkeit zum Stand der Technik herstellen zu können, da i) Untersuchungen nach [DIN 52189] bekannt sind, ii) Untersuchungen nach TGL 25 106 bekannt sind, welche identische Probenabmessungen nutzten und iii) Untersuchungen bekannt sind, die identische Probenabmessungen angeben, aber keiner Norm entsprechen. Weiterhin scheint der gewählte Schlankheitsgrad günstig, da bei einem Verhältnis von $\lambda_p \sim 12$ ein Minimum der Bruchschlagarbeit vorhanden ist²⁸. So werden konservative Werte der Bruchzähigkeit erhalten, die nicht zu einer Überschätzung der Werkstoffe führen. Die Probenabmessungen der einzelnen Werkstoffe ist in Tabelle 3.5 angegeben.

Tabelle 3.5: Probenabmessungen und Widerlagerabstand

	Werkstoffe (vgl. Tabelle 3.3, S. 72)						
Abmessungen in mm	OSB-03-18	PLY-BB-18	PLY-PO-18	PLY-ID-18	PLY-RP-21	PLY-KQ-20	SWP-3F-19
Nennstärke h_p	18	18	18	18	21	20	19
Probenbreite b_p	18	18	18	18	21	20	19
Probenlänge l_p	270	270	270	270	315	300	285
Widerlagerabstand l_w	216	216	216	216	252	240	228

3.2.3 Konstruktive Kerben

Werden aus Holzwerkstoffen Maschinenteile hergestellt, entstehen fertigungs- und konstruktionsbedingt verschiedenartige Kerben. Diese lassen sich in drei Kategorien einteilen: i) Kerben mit einem Radius $< 1 \text{ mm}$ (V-Kerben, Gewinde oder scharfkantige Ausfräsungen), ii) Kerben mit Radius $\geq 1 \text{ mm}$ (Bohrungen, Langlöcher) und iii) Mikrokerben mit einem Radius $\ll 1$ infolge spanender Bearbeitung. Der Einfluss von Kerben auf das Bruchverhalten der Hölzer und Holzwerkstoffe stellt sich als mäßig dar. So hat die Kerbform nur einen untergeordneten Einfluss auf die Bruchschlagarbeit. Wohingegen das bloße Vorhandensein einer Kerbe die Schlagzähigkeit im Bereich um 10 % reduziert (vgl. Kapitel 2.8.5, S. 56). Bei hochverdichteten Presshölzern ist eine Verminderung der Schlagarbeit in Bereichen von 1 % bis 20 % je nach Plattenbau und Schlagrichtung bekannt (vgl. Tabelle 2.7, S. 57). Ebenso reduziert sich mit zunehmender Kerbtiefe die Kerbzähigkeit. Der relativ geringe Rückgang der Schlagarbeit bei Vorhandensein von Kerben, zeugt von einer mäßigen Kerbempfindlichkeit (vgl. Gleichung 2.2, S. 56) von höchstens 1,1 bis 1,8 [Kollmann 1951], S. 861. Um dennoch den praktisch relevanten Einsatzfall eines durch eine konstruktive Kerbe geschwächten Bauteils abbilden zu können, werden an ausgewählten Werkstoffen Kerben eingebracht. Die Kerbgeometrie (vgl. Abbildung 3.7)

²⁸ Zumindest bei Vollholz, bei Schichtholz zeigt sich eine mit steigendem Schlankheitsgrad zunehmende Bruchschlagarbeit (vgl. Kapitel 2.8.4, Abbildung 2.29, S. 56).

entspricht einem einfachen Einschnitt eines Kreissägeblattes²⁹. Dabei werden die Kerben in die der Schlagseite entgegengesetzten, auf Zug beanspruchten, Seite der Probe eingebracht. Es werden Kerben bei Schlagrichtung in Scheiben- und Plattenrichtung untersucht.

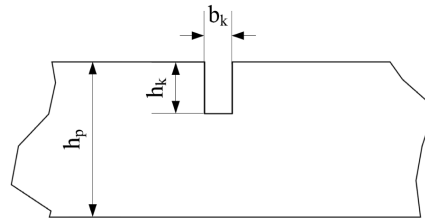


Abbildung 3.7: Geometrie des Sägekerbs

Die Kerbtiefe wird mit $h_k = 1/3 h_p$ der Probendicke festgelegt. Offensichtlich bieten sich bei den ausgewählten Werkstoffen auch abweichende Kerbtiefen an, da besonders bei Sperrhölzern der Anschnitt einer 0° - beziehungsweise 90° - Lage der auf Zug beanspruchten Seite von ausschlaggebender Bedeutung für die Kerbzähigkeit ist. Um aber für spätere vergleichende Untersuchungen, ggf. an Plattenwerkstoffen anderer Dicke oder abweichender Lagenzahl, eine Basis zu schaffen, wird sich auf ein Kerbtiefenverhältnis festgelegt. Die Breite der Kerbe wird durch die Sägeblattbreite $b_k = b_s = 3,6$ mm definiert (vgl. Abbildung 3.7). Die Ausprägung des Kerbgrundes ergibt sich als Doppelkerbe infolge der Schneidengeometrie des Sägeblattes. Die Radien der Sägekerbe sind mit $r_k \ll 1$ mm als ausreichend klein zu beurteilen um eine zusätzlich versprödende Wirkung zu erzielen (vgl. Abbildung 3.8). Die Restquerschnittfläche $A_{q,r}$ ergibt sich entsprechend Gleichung 3.4.

$$A_{q,r} = (h_p - h_k) \cdot b_p \quad \text{Gleichung 3.4}$$

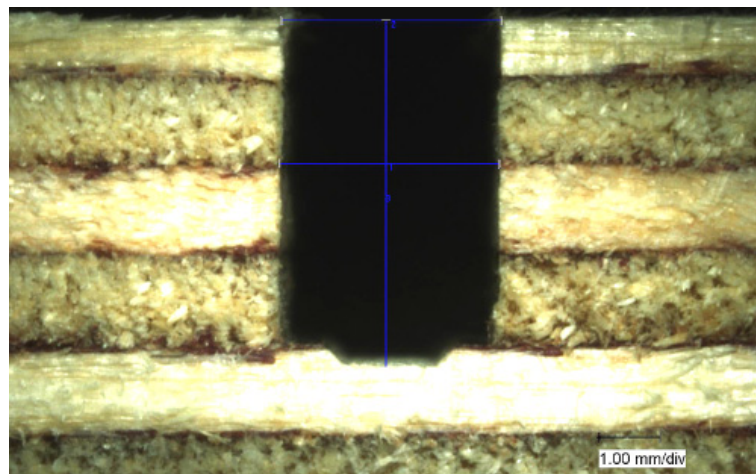


Abbildung 3.8: Mikroskopieaufnahme einer Sägekerbe in Birkensperrholz, Schnittrichtung in Plattenebene. Kerbreite 3,6 mm, Kerbtiefe 5,7 mm

²⁹ Zum einen ist diese Geometrie günstig und vor allem wiederholbar herzustellen, zum anderen stellt diese Art der Schwächung eine häufig auftretenden Fall dar.

3.3 Verfahren zur Klimatisierung, Feuchte- und Dichtebestimmung

Die zugeschnittenen Proben werden in einer Klimakammer bis zur Ausgleichsfeuchte klimatisiert. Die Klimatisierung im Normklima erfolgt nach [DIN EN 310] bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(65 \pm 5)\%$ relativer Luftfeuchte. Nach [DIN EN 310] gilt die Ausgleichsfeuchte als erreicht, wenn der Prüfkörper Massekonstanz aufweist. Die Masse m_p der Proben wird mit einer Feinwaage bestimmt (vgl. Tabelle 3.6). Die Proben, für die eine thermische Schädigung bei Temperaturen von 105°C und 200°C vorgesehen sind, werden in einem Trockenschrank bis zur Massekonstanz (entsprechend der in Abbildung 3.5, S. 68 dargestellten Heizkurven) getrocknet bzw. erwärmt. Nach dem Erwärmen wird die Charge zunächst im Normklima bis zur Massekonstanz reklimatisiert und dann der Schlagprüfung unterzogen.

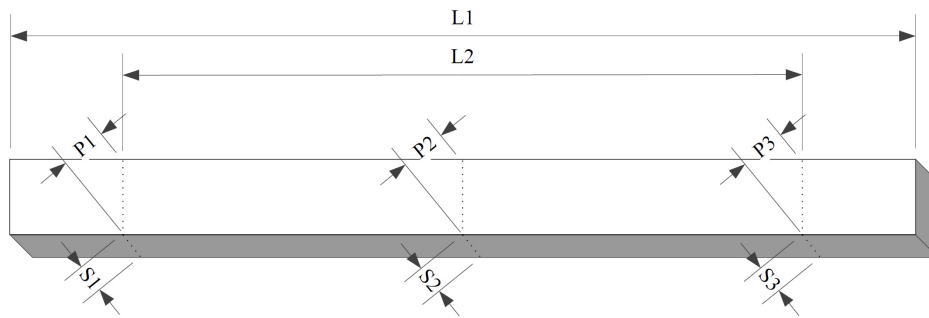


Abbildung 3.9: Für jede Einzelprobe zu ermittelnde Abmessungen

Die Schlagprüfung und die statische Biegeprüfung werden in einem nicht klimatisierten Laborraum durchgeführt. Die Proben werden direkt vor Beginn der Prüfung dem Klimaschrank entnommen. Die mechanische Prüfung erfolgt dann in einem Zeitfenster von ungefähr 15 min nach der Entnahme. Die Bestimmung des Holzfeuchtigkeitsgehaltes $u_{p,k}$ erfolgt nach [DIN EN 322] durch Darrtrocknen. Fünf zufällig ausgewählte Bruchstücke der Proben werden im Anschluss an die mechanische Prüfung bei 105°C getrocknet. Die Feststellung des darrgetrocknen Zustands erfolgt wiederum entsprechend der Massekonstanz der trockenen Probe $m_{p,darr}$ entsprechend [DIN EN 322].

$$V_p = b_p \cdot h_p \cdot l_p; \quad \rho_{p,k} = \frac{m_{p,k}}{V_p}; \quad u_{p,k} = 1 - \frac{m_{p,darr}}{m_{p,k}} \quad \text{Gleichung 3.5}$$

$$b_p = (b_1 + b_2 + b_3)/3; \quad h_p = (h_1 + h_2 + h_3)/3$$

Die Dichte $\rho_{p,k}$ der Probekörper wird durch Messen der Probengeometrie und Wägen des Probengewichtes $m_{p,k}$ jeder einzelnen Probe vor deren mechanischer Prüfung (vgl. Gleichung 3.5) bestimmt. Die Abmessungen der Probekörper werden entsprechend Abbildung 3.9 und Tabelle 3.6 ermittelt. Die Dichte ρ_k und der Feuchtegehalt u_k werden für die jeweilige Charge mit Mittelwert und Standardabweichung für alle Gruppen angegeben.

Tabelle 3.6: Messgeräte bei der Versuchsvorbereitung, Messgrößen und deren Genauigkeit

Maß	Kurzzeichen	Einheit	Messgenauigkeit	Messgerät
Probengewicht	$m_{p,k}$	g	$\pm 0,1$	Feinwaage
Probenlänge, Bruchlänge	l_p, l_b	mm	± 1	Lineal mit Vorrichtung (vgl. Abbildung 3.10, S. 77)
Breite in Plattenebene	b_{1-3}			
Höhe senkrecht zur Plattenebene	h_{1-3}	mm	$\pm 0,1$	Digitalmessschieber
Restbreite im Kerbgrund	h_r			

3.4 Bewertung der Bruchfläche

Holzwerkstoffe können aufgrund ihrer geringen Plastizität generell als spröde brechend charakterisiert werden. Das äußere Erscheinungsbild der Bruchflächen im Schlagversuch kann dennoch variieren. Zum einen kann dieses Bruchbild Erkenntnisse über die Werkstoffcharakteristik vermitteln. Zum anderen besteht in der Ausprägung des Bruchs selbst ein sicherheitsrelevanter Gesichtspunkt. Hier lässt sich ein gewisser Gegensatz ableiten. Denn, sind für eine geringe Verletzungsgefahr glatte Bruchflächen von Vorteil, sind diese im Gegenzug ein Indiz für geringe Schlagzähigkeit der Hölzer und Holzwerkstoffe (vgl. Abbildung 2.33, S. 59). Bei glatten Trennbrüchen ist die Oberfläche klein im Vergleich zu splittrigen bzw. faserigen Brüchen. Die Größe der entstehenden Trennbruchfläche ist so ein Maß für die beim Bruch verbrauchte Energie. Je größer die Bruchfläche ist, je größer ist die Bruchenergie. Dies gilt sowohl für statische wie auch für schlagartige Beanspruchung. Für die Beurteilung der Bruchenergie und der entstehenden Gefährdung durch scharfkantig splittrige Brüche ist die Bewertung der Bruchflächen also notwendig. Die dreidimensionale topologische Erfassung und Messung der entstehenden Bruchoberfläche ist technisch komplex und zeitaufwendig³⁰. Hinzu kommt, dass die Bruchoberfläche für jede einzelne Probe bewertet werden muss, so entstehen große Fallzahlen.

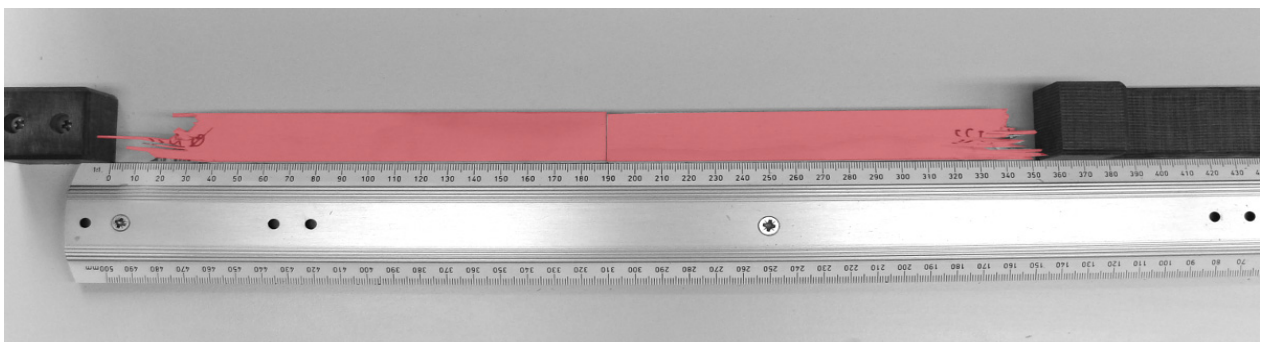


Abbildung 3.10: Vorrichtung zum Messen der Probenlänge und der Bruchlänge. Im Bild die zwei Hälften einer im statischen Biegeversuch zerbrochenen Probe (rot eingefärbt).

³⁰ Realisierbar wäre dies z. B. mittels Stereobildaufnahmen und anschließender Lokalisierung durch Triangulationsverfahren einzelner Pixelcluster mittels Imageprozessing.

Eine Möglichkeit der Vereinfachung ist die Länge des Bereichs zu bestimmen, in dem der Bruch sich ausgewirkt hat. Diese mag zwar nur lose mit der entstehenden Bruchflächengröße korrelieren, lässt sich aber um so einfacher bestimmen (vgl. Abbildung 3.10). Es bleibt abzuwarten, in welchem Grad das Maß der Bruchlänge l_b mit anderen Größen korreliert, bzw. zwischen den verschiedenen Werkstoffen variiert. Offensichtlich ist aber, dass ein ursächlicher Zusammenhang dieses Maßes mit der Bruchoberflächengröße besteht.

3.5 Statische Biegeversuche

Der Vergleich von Kennwerten der Schlagversuche mit denen statischer Biegeversuche hat zum Ziel, das Bruchgeschehen der Werkstoffe in Bezug auf den Einfluss der Belastungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit³¹ interpretieren zu können. Es existieren Parallelen zwischen beiden Versuchen, die einen Vergleich nahelegen (vgl. Kapitel 2.8.3, S. 54). Von besonderem Interesse sind die verschiedenen Phasen des Bruchgeschehens. Die prinzipielle Einteilung in Bereiche elastischen Verhaltens, Bereiche nichtlinearen und / oder plastischen Verhaltens (prior to rupture) und den des Restbruchs (post failure), wird sowohl für statische wie auch für Schlagbiegeversuche vorgenommen (vgl. Abbildung 2.16, S. 45 sowie Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12).

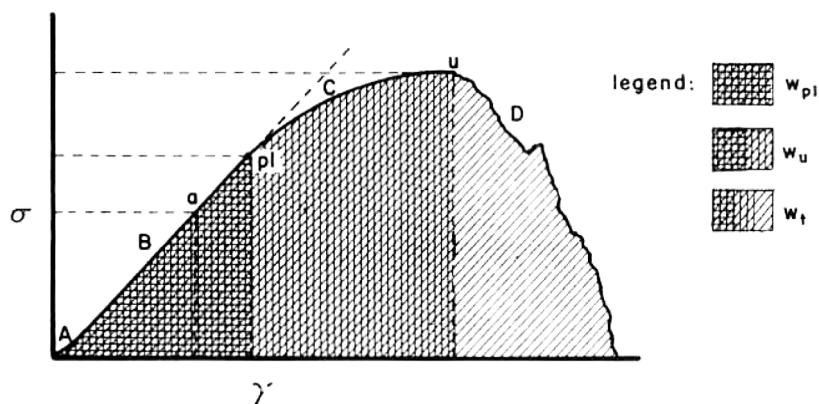


Abbildung 3.11: „Characteristics of the stress-strain curve for wood composites A. Initial alignment, B. Linear elastic, C. Curvilinear; D. Post-failure“ [Bodig & Jayne 1993], Abbildung 2.5, S. 56

Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass der Werkstoff bis zu einer definierten Beanspruchung mit reversiblen Formänderungen und oberhalb dieser Beanspruchung zunächst mit bleibender Formänderung auf diese reagiert. Nach dem zweiten Bereich, der plastischen Formänderung, treten makroskopische Schäden auf, es bilden sich Trennflächen, die schließlich zum Bruch der Probe führen. Der Vergleich der Kraft-Verformungs-Kurven aus dem Schlag- und dem statischen Biegeversuch (vgl. Abbildung 2.16, S. 45 und Abbildung 3.12) könnte den Eindruck

³¹ Im statischen Biegeversuch sind Verformungsgeschwindigkeiten im Bereich von 5 mm/min bis 20 mm/min üblich.

erwecken, dass der Schlagversuch lediglich ein mit Schwingungen überlagerter statischer Biegeversuch ist. So einfach ist dies bei näherer Betrachtung der Abläufe bei beiden Versuchen keineswegs. Im statischen Versuch stehen Probekörper und Belastungseinrichtung (Prüfmaschine) bis zum Bruch stets in Kontakt. Wohingegen beim Schlagversuch auf den sogenannten Trägheitsstoß ein Abfall der Hammerfinnenkraft auf Null zu vermerken ist (vgl. Kapitel 2.7.1, S. 43 und 3.6.4, S. 89). Erst nach diesem Nulldurchgang, wenn Probekörper und Hammerfinne wieder in Berührung stehen, steigt die Kraft wieder an. Dieser dynamisch elastische Vorgang hat im statischen Versuch keine Entsprechung. Weiterhin sind beim Schlagversuch, infolge unvermeidbarer Eigenschwingungen der Belastungseinheit und der Probe selbst, über den Versuchsablauf stark schwankende Beanspruchungsgeschwindigkeiten möglich. So sind es wesentlich die durch die Massenträgheit induzierten Wechselwirkungen zwischen Probe und Belastungseinheit, die den statischen vom dynamischen Versuch unterscheiden. Daraus kann geschlossen werden, dass, bleiben alle andere Bedingungen gleich, sich mit zunehmender Dichte auch der Unterschied zwischen statischem und dynamischem Prüfergebnis vergrößert. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese Annahme in den Ergebnissen der Arbeit bestätigt. Möglicherweise liegt aber hierin der Schlüssel für die Klärung nach der Vergleichbarkeit beider Versuche, die schon [Ghelmeziu 1938] gestellt hat (vgl. Kapitel 2.8.3, S. 54).

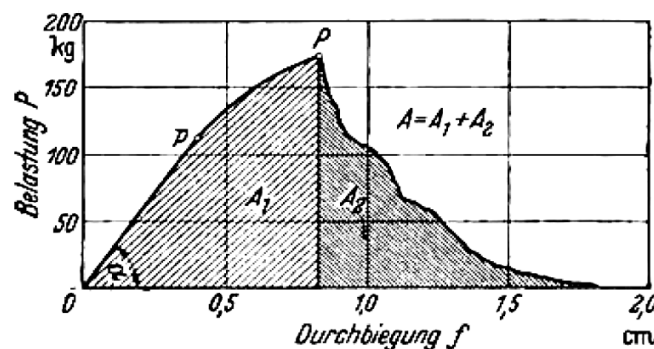


Abbildung 3.12: „Belastungs-Durchbiegungs-Schaubild beim statischen Biegeversuch“ [Ghelmeziu 1938], Abbildung 1

Die statischen Biegeversuche werden auf einer Universalprüfmaschine mit einer entsprechenden Vorrichtung zur Biegeprüfung ausgeführt (vgl. Abbildung 3.13). Alle geometrischen Bedingungen wie Stützweite oder Durchmesser des Biegestempels und der Widerlager sind die gleichen wie im Schlagversuch. Die Belastungsgeschwindigkeit wird mit 10 mm/min ($1,67 \cdot 10^{-4}$ m/s) eingestellt³². Verglichen zum Schlagversuch mit ~ 5 m/s Belastungsgeschwindigkeit ergibt sich also eine um den Faktor $1/3 \cdot 10^4$ geringere Belastungsgeschwindigkeit. Zur Kraftmessung wird eine kalibrierte 10 kN Kraftmessdose verwendet. Die Durchbiegung wird anhand des zurückgelegten Stempelwegs mit dem integrierten Wegmesssystem aufgezeichnet. Für jedes Setup der Maschine wird eine Maschinenkennlinie aufgezeichnet.

³² Die Geschwindigkeit wird so gewählt das der Versuch bis zum Bruch in einer Zeitdauer kleiner 60 s erfolgt.

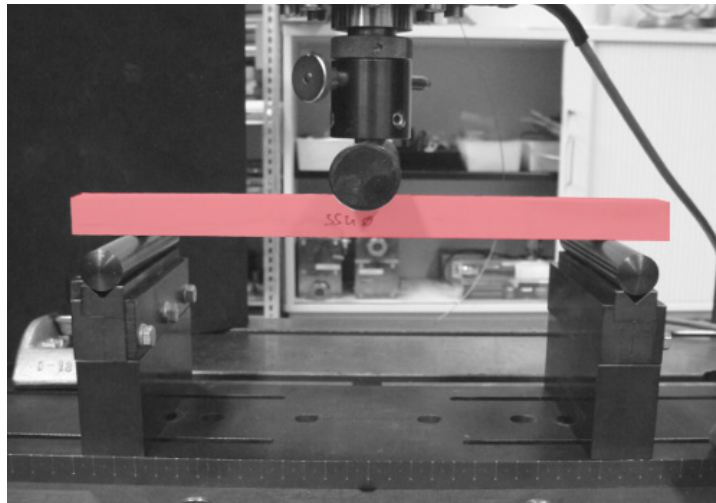


Abbildung 3.13: Aufbau der statischen Biegeprüfung, Widerlagerabstand einstellbar (Probekörper rot eingefärbt)

3.6 Aufbau und Wirkungsweise der Versuchseinrichtung zur Schlagprüfung

3.6.1 Mechanischer Aufbau

Es wurde eine Recherche nach am Markt verfügbarer Prüftechnik zur Schlagprüfung von Holzwerkstoffen durchgeführt. Es zeigte sich, dass keine Pendelschlagwerke mit Spezifikation für die in [DIN 52189] angegebenen Probengrößen und Instrumentierung verfügbar waren. So wurde zur Umsetzung des Messsystems ein Schlagpendel für die Prüfung von Stahlproben nach Charpy mit 150 J Arbeitsvermögen und Ausrüstung für metallische Proben genutzt.

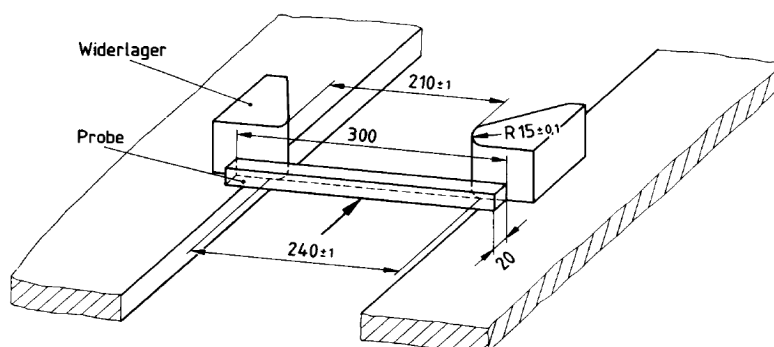


Abbildung 3.14: „Anordnung der Probe an den Widerlagern des Pendelschlagwerks“ [DIN 52189]

Die Ausrüstung des Schlagpendels für Proben aus Holz sowie die Instrumentierung des Hammerkopfes erforderte einige Umbauten. Die Geometrie der Widerlager für die Schlagprüfung von Holzwerkstoffen ist in der Norm angegeben (vgl. Abbildung 3.14). Die Probenabmessungen für Versuche an Holz sind deutlich größer als die der Stahlproben. Infolge dessen reichte der lich-

te Widerlagerabstand im ursprünglichen Gestell des Schlagpendels nicht aus. Durch die Umkehr der Schlagrichtung konnte dieses Problem gelöst werden. Neue Widerlager für die entgegengesetzte Schlagrichtung wurden als Schweißkonstruktion umgesetzt (vgl. Abbildung 3.15). Diese sind für verschiedene Probenabmessungen justierbar gestaltet. Um die Widerlager möglichst steif in Schlagrichtung zu gestalten, kommen massive Verstreben zum Einsatz. Da keine Fixierung des Pendelschlagwerkes am Laborfundament möglich war, wurde eine zusätzliche Fundamentmasse in Form von Stahlplatten vorgesehen. Diese wurden so dimensioniert, dass „... die Masse des Fundaments mindestens der 40fachen Pendelmasse entspricht.“ [DIN EN ISO 148-2], S. 11. Die Fundamentplatten wurden zunächst grob horizontal ausgerichtet. Durch die Einbringungen einer Dreipunktauflage mit Stellschrauben konnte das Pendel nachfolgend feinjustiert werden.

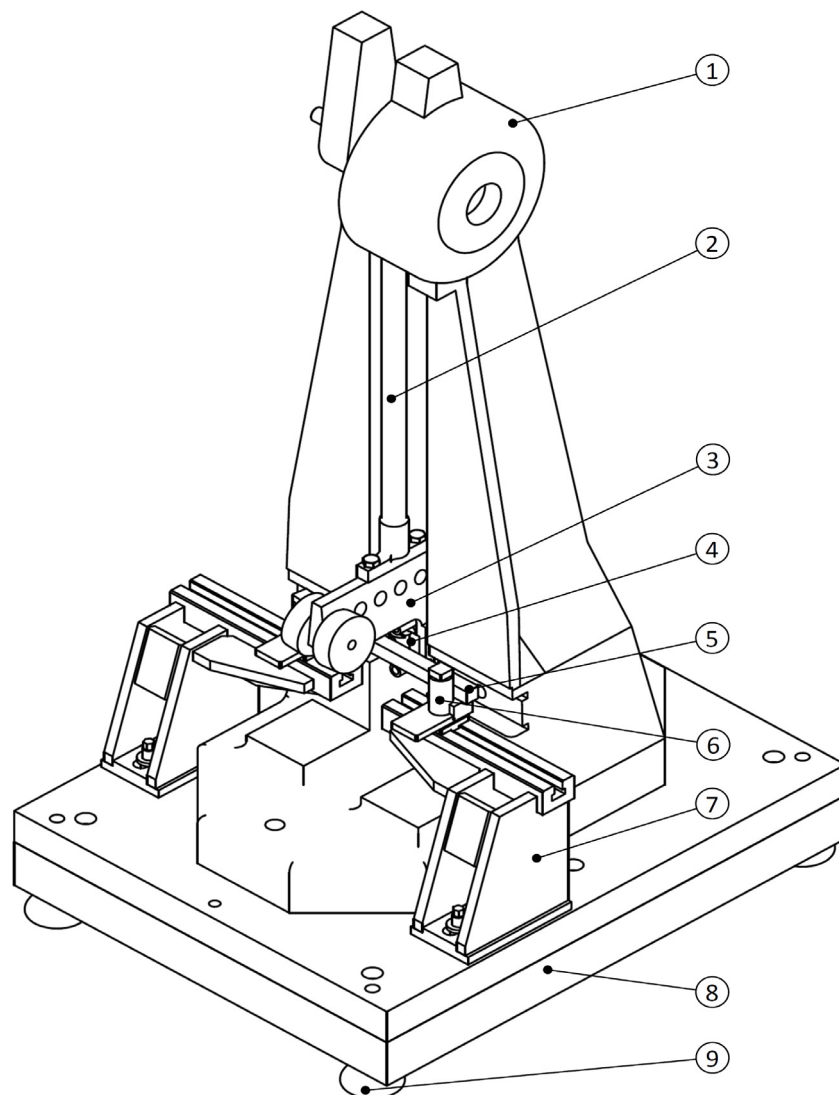


Abbildung 3.15: Baugruppen des instrumentierten Schlagpendels: 1 Gestell, 2 Pendelstange, 3 Hammerkopf, 4 Hammerfinne, 5 Probe, 6 Probenwiderlager, 7 Widerlagerträger, 8 Fundamentmasse, 9 Maschinenfuß

3.6.2 Verwendete Messtechnik / Instrumentierung

Vorgaben für die Instrumentierung von Pendelschlagwerken sind in [DIN EN ISO 179-2] für Kunststoffproben und [DIN EN ISO 148-2] für Stahlproben angegeben. Vorgaben für die Instrumentierung von Schlagwerken zur Prüfung von Holzwerkstoffen existieren in der Normung nicht, jedoch können aus [DIN EN ISO 13802] sowie der Literatur wichtige Anregungen für den Aufbau der Messkette entnommen werden. Prinzipiell bestehen hierzu drei Möglichkeiten: i) die Instrumentierung der Hammerfinne, ii) die Instrumentierung der Probenwiderlager oder iii) die Instrumentierung von Widerlager und Finne. In der Literatur sind dazu jeweils verschiedene Lösungen bekannt (vgl. Kapitel 2.7, S. 43). Um einerseits möglichst nah am Ort des Bruches, also der höchsten Beanspruchung, zu messen und andererseits auch die Vergleichbarkeit zum statischen Biegeversuch³³ herstellen zu können, wird die Instrumentierung der Hammerfinne vorgezogen. Es ist davon auszugehen, dass während des Bruchvorganges Druckkräfte auf die Hammerfinne einwirken. Zugkräfte an den Sensoren entstehen infolge der Massenträgheit der Hammerfinne (vgl. Abbildung 3.16). Diese, so wie das gesamte Pendel, werden durch den Schlag zu Eigenschwingungen angeregt. Die Zugkräfte liegen aber nach erster Einschätzung in ihrer Magnitude betragsmäßig deutlich unter den beim Bruch auftretenden Druckkräften. Insofern können Kraftsensoren Anwendung finden, die für Druckkraftmessungen konzipiert sind, aber gleichzeitig in einem geringeren Bereich auch Zugkräfte aufnehmen können (vgl. Tabelle 3.7 und Abbildung 3.16). Die erwartbaren Kräfte werden aus den Bruchkräften im statischen Versuch, mit einer gewissen Überlastsicherheit, abgeschätzt. Die Auflösung der Sensoren mit den zugehörigen Ladungsverstärkern liegt bei maximaler Verstärkung entsprechend Tabelle 3.7 bei ± 10 mN. Eine mechanische Führung der Hammerfinne, zur Aufnahme von Biegemomenten bei außerzentrische Lasteinleitung, wird nicht vorgesehen, da diese zu Reibverlusten beim Prüfvorgang führt. Um dennoch Biegemomente zu verhindern, werden zwei Kraftsensoren parallel verbaut. Weiterhin wurde ein Beschleunigungssensor verbaut (vgl. Tabelle 3.7 und Abbildung 3.16). Das Beschleunigungssignal kann theoretisch, bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit, durch Doppelintegration, in das Wegsignal der Hammerfinne umgerechnet werden. Dieses Verfahren zur Wegmessung wird auch bei [Bröker & Salamon 1989] beschreiben. Entsprechend [DIN EN ISO 179-2] ist die Bestimmung des zurückgelegten Weges der Hammerfinne auch „... durch Doppelintegration der Kraft-Zeit-Kurve ...“ [DIN EN ISO 179-2], S. 7 zulässig. Die Nutzung von Kraft- und Beschleunigungssensoren erscheint also auf den ersten Blick redundant. Bei der Analyse der Literatur (vgl. Kapitel 2.7.2, S.46) zeigte sich aber der Nutzen separater Messsysteme für Kraft und Beschleunigung (bzw. Weg). Bei ersten Vorversuchen bestätigte sich dieses Vorgehen. Die Auswahl der Sensoren erfolgt unter dem Gesichtspunkt einer möglichst hohen Zeit- und Amplitudenauflösung. Piezoelektrische Messelemente sind für diese Spezifikation aufgrund ihrer geringen Eigenmasse, Baugröße und hohen Grenzfrequenz besonders geeignet.

³³ Beim statischen Biegeversuch werden ebenso Kraft- und Wegänderung am Stempel der Prüfmaschine gemessen.

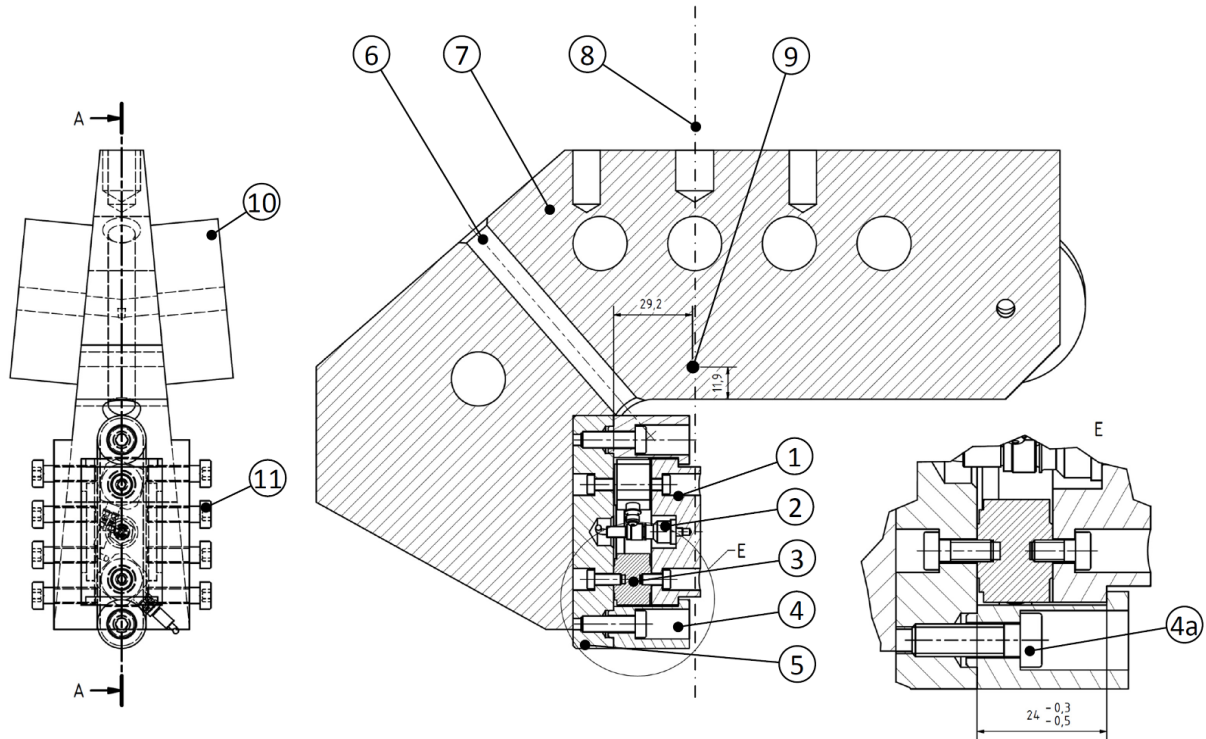


Abbildung 3.16: Hammerkopf: 1 Hammerfinne, 2 Beschleunigungssensor, 3 Kraftsensoren, 4 Zugversteifung, 4a Vorspannschrauben, 5 Sensorträger, 6 Kabeldurchführung, 7 Hammerkopf, 8 Pendelstangenachse, 9 Schwerpunkt, 10 Ausgleichgewicht, 11 Klemmschraube (Skizze nicht maßstabsgetreu)

Für die Integration der Sensorik in das Messsystem war die Entwicklung eines neuen Hammerkopfes erforderlich (vgl. Abbildung 3.16). Die aufgebaute Messkette ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

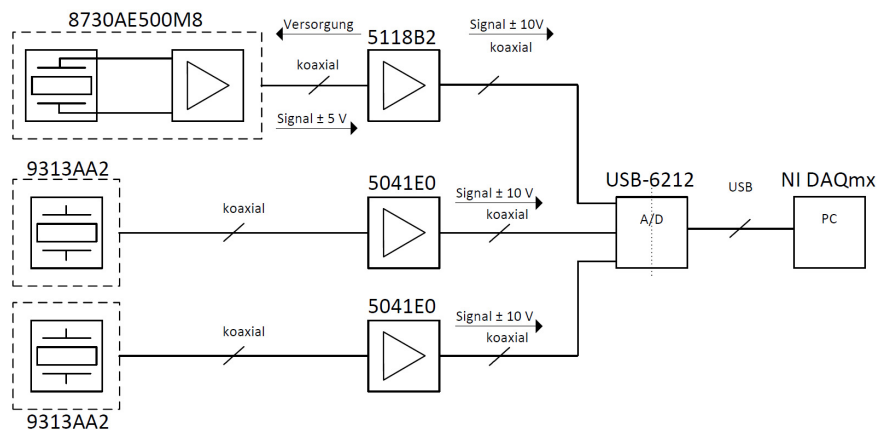


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung der Messkette zur Beschleunigungs- und Kraftmessung (vgl. Tabelle 3.7)

Der Hammerkopf (vgl. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.18) ist so aufgebaut, dass die Kraftsensoren als parallele Steifigkeiten wirken. Da die Sensoren keine Möglichkeit der Vorspannung bieten (die Befestigung erfolgt beidseitig über Sacklöcher) werden zusätzlich Vorspannelemente in Form von Zugversteifungen angebracht. Diese ermöglichen es, die Senso-

ren mit der Hammerfinne definiert vorzuspannen. Belastungen der Sensoren in Zugrichtung, die bei Schwingungen des Systems in Folge der Finnenträgheit entstehen, werden so ausgeschlossen. Dies gilt, solange sich das System Finne-Sensoren-Zugversteifungen im vorgespannten Bereich befindet. Die Hammerfinne wurde zum Aufbringen der Vorspannung in einer Universalprüfmaschine mit 4 kN belastet und die beiden Vorspannschrauben dann handfest angezogen. Um die Hammerfinne, bei begrenztem Bauraum möglichst leicht zu halten, ist diese in Aluminium ausgeführt. Als Begründung für dieses Vorgehen lässt sich einerseits die geringere mechanische Impedanz des Systems bei einer leichteren (im Vergleich zu Stahl) Hammerfinne anführen. Diese niedrigere Impedanz ermöglicht eine „feinfühligere“ dynamische Messung. Andererseits sind auch die höheren Dämpfungswerte, von Aluminium im Vergleich zu Stahl, günstig, da so Schwingungen der Hammerfinne in ihrer Amplitude schneller abnehmen. Die Hammerfinne ist u-förmig ausgeführt um zum einen das Flächenträgheitsmoment, und so die Biegesteifigkeit, möglichst groß zu gestalten. Zum anderen bieten die seitlichen Stege einen gewissen Schutz gegen mechanische Beschädigung der Sensoren und Kabel beim Schlagversuch. Das gesamte Messsystem ist an einen Sensorträger montiert, der in einer Passung im Hammerkopf geführt ist und mit Klemmschrauben fixiert wird. So wird eine einfache Höhenjustierung des Messsystems gewährleistet. Zudem erhöht diese zusätzliche vorgespannte Kontaktstelle die Dämpfung des Gesamtsystems Messsystem-Hammerkopf (vgl. Abbildung 3.18), was sich wiederum positiv auf die rasche Amplitudenabnahme der entstehenden Schwingungen des gesamten Hammerkopfes auswirkt. Der gesamte Hammerkopf ist so austariert, dass der Schwerpunkt der Konstruktion auf der Pendelstangenachse liegt. Hierfür sorgen Ausgleichsgewichte und Bohrungen an den entsprechenden Stellen. Die Kontaktfläche der Hammerfinne liegt konstruktionsbedingt 2 mm vor der Pendelstangenachse.

Tabelle 3.7: Auflistung der eingesetzten Messtechnik zur Kraft- und Beschleunigungsmessung

Bezeichnung	Spezifikation der Messtechnik*					
	Type	Hersteller	Empfl.	Messber.	Untere Freq. lim.	Obere Freq. lim.
Kraftsensoren 1-achsig	2x 9313AA2	Kistler	10 pC/N	0 ... 20 kN	Keine, aber Drift von max 10e-3 N/s	10 % Amplitudenfehler bei $0,3 \times f_n$; $f_n > 34,6$ kHz
Ladungsverstärker	2x 5041E0	Kistler	$\pm 0,1$ pC	$\pm 100 \dots 99900$ pC	-	Bei Eingangskapazität von ~ 300 pF ~ 100 kHz Grenzfrequenz
Beschleunigungssensor 1-achsig	1x 8730AE 500M8	Kistler	10 mV/g	± 500 g	$f_{-3dB} = 0,3$ Hz $f_{-3dB} \approx 0.16/TC$ $TC = 0,5$ s	5 % Amplitudenfehler bei $9/40 \times f_n$ $f_n = 76$ kHz
Coupler	1x 5118B2	Kistler	-	± 5 V	$f_{-3dB} = 0,03$ & $0,006$ Hz $f_{-3dB} \approx 0.16/TC$ $TC = 5$ & 25 s	5 % Amplitudenfehler bei $f_n > 40$ kHz (Verstärkung = X1)
A/D-Wandler	1x NI USB-6212	National Instruments	-	-	-	400 kS/s Abtastrate (kumulativ)

* die angegebenen Werte sind den jeweiligen Datenblättern entnommen

Das softwareseitige Frontend zur Datenakquise wurde mit LabView^{®34} erstellt. Die Daten werden als unskalierte Spannungswerte mit Zeitstempel für die einzelnen Kanäle im Textformat für jede Messung einzeln abgelegt. Die Datenanalyse wird im Nachgang getrennt in der Entwicklungsumgebung **R**³⁵ entwickelt und implementiert. Alle Analyseprogramme arbeiten ausschließlich in SI-Basiseinheiten: [Datenakquise] = V, [Datenanalyse] = N, m, s. Die Umrechnung von Spannung in Kraft und Beschleunigung bzw. Weg erfolgt stets zu Beginn der Datenanalyse, da teilweise mit verschiedenen Messbereichen der Kraftsensoren gemessen wurde. Die Skalierung der Basiseinheiten (z. B. von N zu kN) erfolgt grundsätzlich erst bei der Erstellung der verwendeten Diagramme.

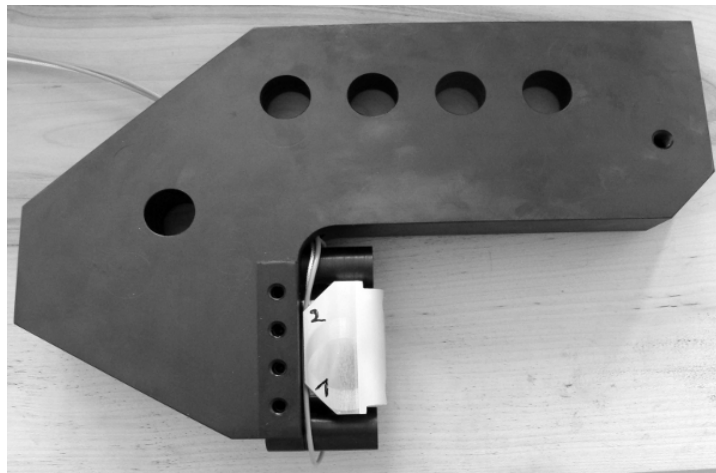


Abbildung 3.18: Vormontierter Hammerkopf mit Messsystem und Kabeldurchführung (ohne Ausgleichsgewichte)

3.6.3 Physikalische Beschreibung des Pendels

Mithilfe des theoretischen Beschleunigungsverlaufs und der bekannten Masse der Hammerfinne, lässt sich der theoretische Kraftverlauf an der Hammerfinne bei freien Schwingungen des Pendels bestimmen. Zunächst sind die Kräfteverhältnisse am mathematischen Pendel darzulegen (vgl. Abbildung 3.19). Aus der Gewichtskraft F_g ergibt sich die winkelabhängige Tangentialkraft F_{tan} , die, da keine weiteren äußeren Kräfte einwirken, als einzige rücktreibende Kraft F_r wirkt (vgl. Gleichung 3.6). Infolge der großen Anfangsauslenkung φ_0 die für Schlagversuche üblich ist, kann die Vereinfachung der Kleinwinkelnäherung $\sin \varphi = \varphi$ nicht angewendet werden. Die Bewegungsgleichung (vgl. Gleichung 3.7) vereinfacht sich nicht zu einer linearen Differentialgleichung und ist so auch nicht (ohne weiteres) analytisch lösbar. Numerisch kann die Lösung jedoch, nach Rückführung auf ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung, approximiert werden (vgl. Abbildung 3.21).

34 Vgl. [National-Instruments 2015]

35 Vgl. [R-Foundation 2015]

$$\begin{aligned} F_r(t) &= -F_g \sin(\phi(t)) = -mg \sin(\phi(t)) \\ F_r(t) &= F_{\tan}(t) = m r \ddot{\phi}(t) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

$$\ddot{\phi}(t) + \frac{g}{r} \sin(\phi(t)) = 0, \quad r = r_t, \quad r_t \neq r_m \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Da sich die Masse des Pendels kürzt, sind nur die geometrischen Parameter ausschlaggebend für die Beschreibung des Schwingungsvorganges (des mathematischen Pendels). Der theoretische Radius r_t bezeichnet im Folgenden den Abstand r zwischen Drehachse und Massenmittelpunkt eines mathematischen Pendels, das in seiner Periodendauer T_p der des realen Pendels entspricht. Dabei ist dieser Abstand nicht gleich zu setzen mit dem Abstand r_m zwischen Drehachse und Probenmitte (vgl. Abbildung 3.19).

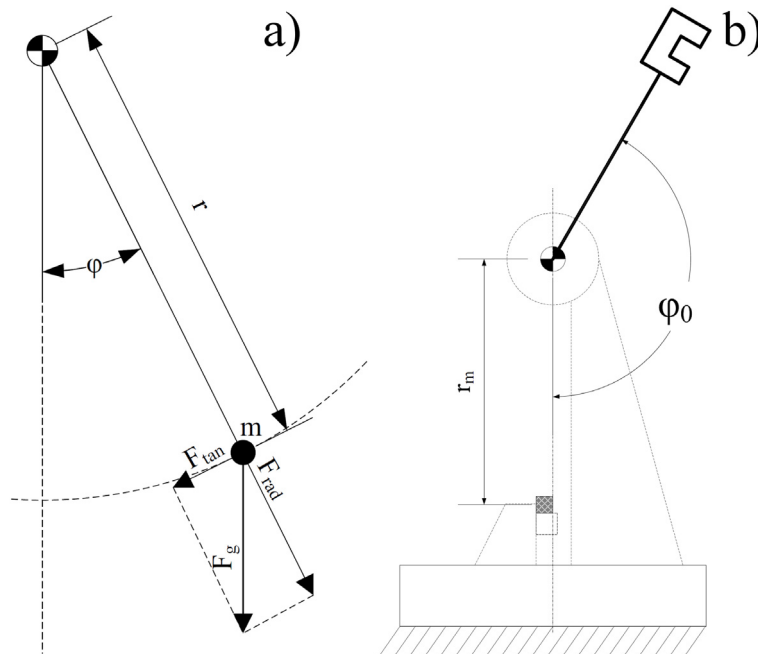


Abbildung 3.19: a) Kräftezerlegung am mathematischen Pendel und b) Prinzipskizze des realen Pendels.

Die Periodendauer wird bei freien Schwingungen des Pendels mit kleinen Auslenkungen ($\phi_0 < 5^\circ$)³⁶ bestimmt, so dass $\sin \phi \approx \phi$ gilt. Die freien Schwingungen des Pendels wurden mithilfe der integrierten Messtechnik erfasst (vgl. Abbildung 3.20). Es zeigt sich ein stark verrauschtes, linear abfallendes und mit einer Schwingung überlagertes Signal der Kraftsensoren. Das starke Rauschen liegt in der äußerst geringen Messbereichsausnutzung der Kraftsensoren begründet (vgl. Tabelle 3.7). Der lineare Abfall des Signals begründet sich im Drift der piezoelektrischen Sensoren. Durch Anpassen von Gleichung 3.8 an das Messsignal lässt sich neben der Periodendauer T_p auch die Driftkonstante k_d und der Offset der Sensoren k_{off} bestimmen. Die Konstante der Amplitudenausprägung C_0 dient nur der mathematischen Anpassung.

36 Vgl. Hierzu [DIN EN ISO 13802], S. 5

$$F(t) = C_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T_p}\right) - (k_d \cdot t + k_{off}) \quad \text{Gleichung 3.8}$$

So beträgt die Periodendauer $T_p = 1,70$ s, die Driftkonstante³⁷ $k_d = 8\text{e-}3$ N/s und der Offset mit $k_{off} = 0,18$ N. Die aus der bestimmten Periodendauer resultierende theoretische Pendellänge wird nach Gleichung 3.9 berechnet und beträgt $r_t = 718$ mm. Die tatsächliche Schlaglänge wurde am Pendel gemessen und beträgt $r_m = 793$ mm.

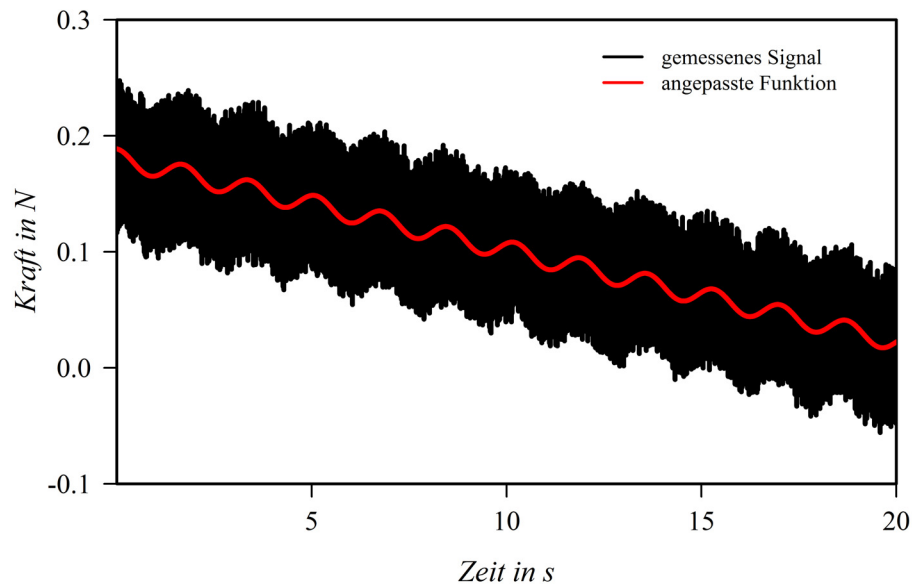


Abbildung 3.20 Gemessene Kraft-Zeit-Kurve bei freien Schwingungen mit Anfangsauslenkung $\varphi_0 < 5^\circ$. Die Massenträgheit der Hammerfinne wirkt auf die Kraftsensoren, wodurch ein messbares Signal entsteht.

[DIN EN ISO 13802], S. 8

$$r_t = \frac{g \cdot T_p^2}{4 \cdot \pi^2} \quad \text{Gleichung 3.9}$$

Nach [DIN EN ISO 13802], S. 9 darf der Unterschied zwischen theoretisch aus der Schwingungsperiode bestimmter Pendellänge und tatsächlich gemessener Schlaglänge nur 1 % betragen. Eine Begründung hierfür wird nicht angegeben. Es kann vermutet werden, dass die Begründung in der Vermeidung von Schwingungen der Pendelstange liegt. Durch Lastangriff außerhalb des theoretischen Massemittelpunktes wirkt ein Biegemoment auf die Pendelstange ein, dass zu Schwingungen dieser relativ weichen Konstruktion führt³⁸. Die Folge sind verfälschte Werte der Brucharbeit, soweit diese aus der Höhe nach dem Schlag bestimmt werden. Für das hier vorgestellte Messsystem ist die in der Norm angegebene Grenze von 1 % Differenz nicht ausschlaggebend, da i) das Pendelschlagwerk nicht der genannten Norm unterliegt, ii) die niederfrequenten Schwingungen der Pendelstange im Vergleich zum Bruchzeitraum keine wesentliche

³⁷ Die Driftkonstante ist im Datenblatt zum Sensor mit maximal $10\text{e-}3$ N/s angegeben.

³⁸ Eigene Analyse ergaben eine erste Eigenfrequenz von ~ 12 Hz

Signalverfälschung verursachen (vgl. Kapitel 3.6.7, S. 96) und iii) die Messung nicht auf der Höhendifferenz vor und nach dem Schlag beruht, sondern Kraft- und Beschleunigungssignale während des Bruches aufzeichnet. Die numerische Lösung von Gleichung 3.7 mit Gleichung 3.9 ergibt die Zustandsvariablen über der Zeit (vgl. Abbildung 3.21). Dabei sind die Verläufe von tangentialer Geschwindigkeit und Beschleunigung für die Finnenmitte, also im Abstand r_m vom Drehpunkt, angegeben. Die Auftreffgeschwindigkeit v_0 der Finnenmitte auf den Probekörper bei $\varphi = 0^\circ$ wird aus dem Verlauf der Tangentialgeschwindigkeit ermittelt und beträgt 5,77 m/s.

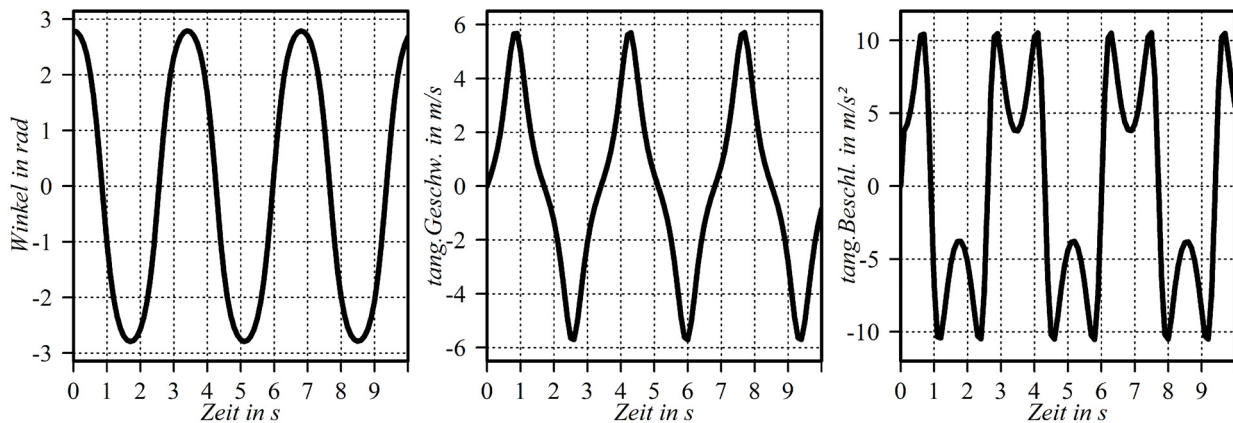


Abbildung 3.21: Zustandsvariablenverlauf über der Zeit, ermittelt für ein mathematisches Pendel mit den Parametern $r_t = 718$ mm und $\varphi_0 = 160^\circ$, berechnet für den tatsächlichen Abstand von Drehpunkt und Finnenmitte von $r_m = 793$ mm

Wird die Auftreffgeschwindigkeit aus der Fallhöhe Δh und der Anfangsauslenkung $\varphi_0 = 160^\circ$ nach Gleichung 3.10 berechnet, ergibt sich ein geringfügig niedrigerer Wert der Auftreffgeschwindigkeit von $v_0 = 5,49$ m/s. Die Abweichung zur oben genannten Auftreffgeschwindigkeit, berechnet aus der numerisch gelösten Differentialgleichung, resultiert aus der fehlerbehafteten Bestimmung des Radius r_t des mathematischen Pendels aus der Periodendauer mittels Kleinwinkelnäherung. Für alle folgenden Berechnungen wird entsprechend die Auftreffgeschwindigkeit von $v_0 = 5,49$ m/s angenommen.

$$\Delta h = r_m \cdot (1 + \cos(180^\circ - \varphi_0)); v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad \text{Gleichung 3.10}$$

Infolge des neu entwickelten und instrumentierten Hammerkopfes resultiert eine geringfügig veränderte Schlagenergie. Verfügte das ursprüngliche Pendelschlagwerk über einen Nennarbeitsvorrat W_{nenn} von 150 J, erreicht das Pendelschlagwerk mit dem neu konzipierten Hammerkopf nur noch 129 J. Nach Gleichung 3.11 kann diese bei bekanntem Trägheitsmoment J_p bestimmt werden. Für diese Arbeit wurde das Trägheitsmoment des Pendels aus einem detaillierten CAD-Modell bestimmt und beträgt $J_p = 5,37$ kg·m². Das ursprüngliche Pendel mit dem nicht-instrumentierten Hammerkopf wies ebenso in einem detaillierten CAD-Modell ein Trägheitsmoment von 6,30 kg·m² auf. Das für das ursprüngliche Pendel aus den CAD-Daten nach

Gleichung 3.11 errechnete Arbeitsvermögen beträgt 151 J. Es zeigt sich also, dass die Trägheitsmomente aus einem detaillierten CAD-Modell ausreichend genau bestimmt sind.

$$W_{\text{nenn}} = \frac{1}{2} \cdot J_P \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot J_P \cdot (v_0 / r_m)^2 \quad \text{Gleichung 3.11}$$

Die konstruktionsbedingte Reduzierung des Nennarbeitsvorrats um 16 % ist im Bezug auf die Vergleichbarkeit zu anderen Messreihen kritisch zu bewerten. Hingegen ist sie für die in dieser Arbeit vorgenommenen vergleichenden Messreihen nicht von Bedeutung.

3.6.4 Zeitliche Beschreibung des Bruchverlaufs

Für die Prüfung genormter Stahlproben gilt: „Das Kraftmesssystem (Kraftaufnehmer, Verstärker, Aufzeichnungssystem) muss eine obere Grenzfrequenz von mindestens 100 kHz aufweisen; dies entspricht einer Anstiegszeit t_r von nicht mehr als 3,5 μs .“ [DIN EN ISO 14556], S. 8. Betreffend die Prüfung von Kunststoffproben ist in [DIN EN ISO 179-2] eine minimale Abtastfrequenz des Kraftmesssystems von 100 kHz angegeben. Beides gilt analog auch für die Abtast- bzw. Grenzfrequenzen des Wegmesssystems. Im vorhandenen System wurde so eine zu erreichende Abtastfrequenz von 100 kHz angestrebt. Diese wird mit dem angegebenen Setup erreicht. Ohne an dieser Stelle näher auf das Abtasttheorem³⁹ einzugehen, entspricht die maximal erfassbare Frequenz der Kraft- bzw. Beschleunigungssignale so 50 kHz. Der zeitliche Verlauf des Bruches (vgl. auch Kapitel 2.7.1, Abbildung 2.16, S. 45) unterscheidet sich zwischen den Holzarten teils deutlich (vgl. Abbildung 3.22), teilweise treten aber auch wesentliche Parallelen zwischen augenscheinlich sehr unterschiedlichen Werkstoffen auf (vgl. Abbildung 3.22 bis Abbildung 3.24). Es muss davon ausgegangen werden, dass die Art des Versuches, die im Grundprinzip bei allen Schlagversuchen gleich bleibt, einen Einfluss auf die Charakteristik der Kraftverläufe besitzt. Dies wird besonders bei Betrachtung der direkt auf den Aufprall folgenden ersten Kraftspitze, dem sogenannten „*Trägheitsmaximum*“ [DIN EN ISO 179-2], [Bröker & Salamon 1989] und dem nachfolgenden Abfall der Kraft bis teilweise in den Zugkraftbereich deutlich. Auch ist erkennbar, dass stets Schwingungen (von Probe und / oder Messsystem) überlagert sind. Diese Schwingungen bereiten bei kumulativen Größen (Energie / Arbeit) keine Probleme, wohingegen bei der Analyse von skalaren Kraft-, Weg- oder Zeitkennwerten Verfälschungen möglich sind. Beeinflusst also das Messsystem den Kraftverlauf, muss dies bei der Auswertung der Daten Berücksichtigung finden. Zum dynamischen Verhalten des Messsystems werden dementsprechend in Kapitel 3.6.7, S. 96 Untersuchungen angestellt.

³⁹ Nach dem Whittaker-Kotelnikow-Shannon (WKS)-Abtasttheorem (vgl. [Höher 2013], S. 358)

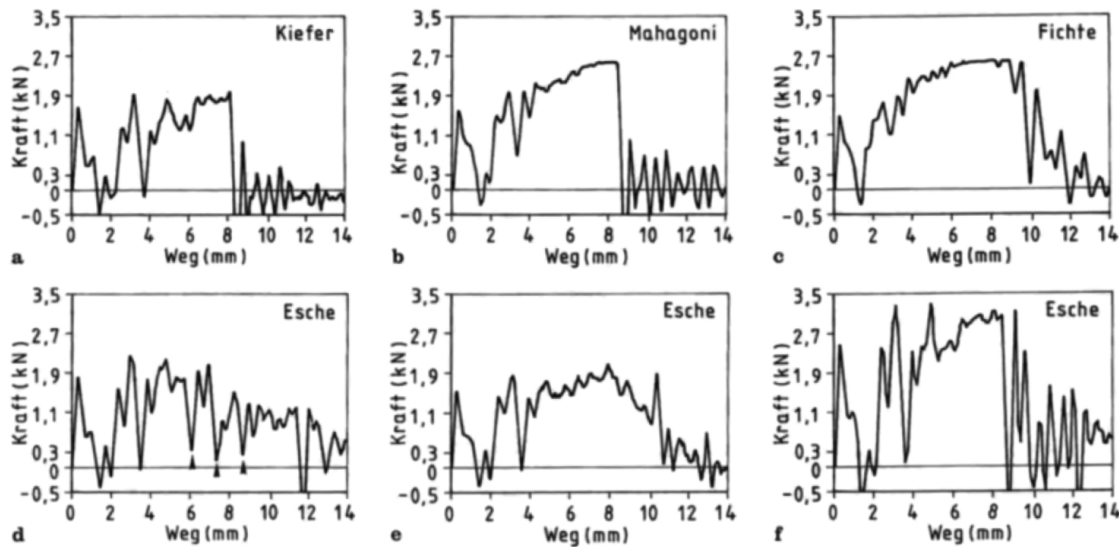


Abbildung 3.22: „Kraft-Weg-Diagramme der Holzarten, a Kiefer, b Mahagoni, e Fichte, d-f Esche“ [Bröker & Salomon 1989], Abbildung 8a-f

Der prinzipielle Ablauf des Versuchs gliedert sich in die Phasen i) Auslösen und freie Schwingung, Auftreffen der Hammerfinne auf der Probe, Anstieg der Kraft bis zum Trägheitsmaximum, Abfallen der Kraft auf Null teils Übergang in den Zugkraftbereich ii), erneuter Anstieg der Kraft bis zum Kraftmaximum, Bruchbeginn, teils wiederholter starker Abfall nahe zu Null und erneuter Anstieg, iii) Abfall der Kraft, vollständiger Bruch teils kleinere Kraftausschläge und Durchziehen durch die Widerlager, Ausschwingen des Messsystems. Es besteht die Möglichkeit, dass das absolute Kraftmaximum mit dem ersten Peak (dem Trägheitsmaximum) zusammenfällt. Eine ähnliche Einteilung der Phasen findet auch bei [Bröker & Salomon 1989] statt (vgl. Abbildung 2.16, S. 45). Der Beginn der zweiten Phase trifft auch hier mit dem Nulldurchgang bzw. dem Minimum nach dem Trägheitsmaximum zusammen.

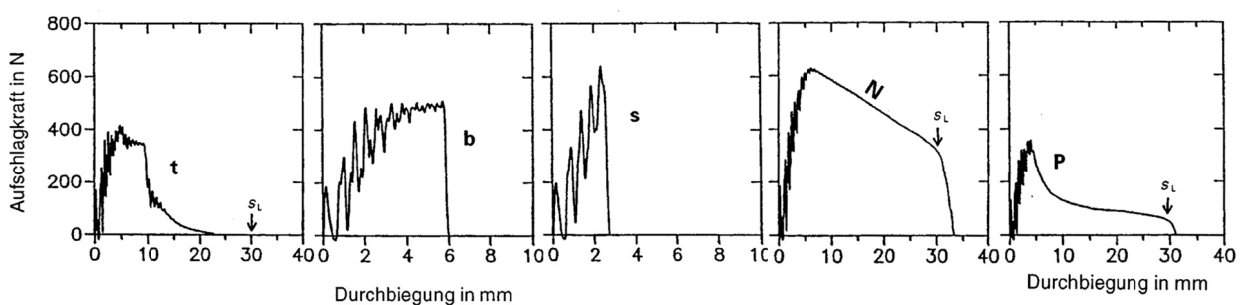


Abbildung 3.23: Zusammengestellt aus: „Typische Kraft-Durchbiegungs-Kurven, die verschiedene Versagensarten für schmalseitig geprüfte Probekörper Typ 1 zeigen“ [DIN EN ISO 179-2], Abbildung 2

Für die Bewertung der Werkstoffcharakteristik sind offensichtlich die letzten beiden Phasen, vor allem aber die Zweite von Bedeutung. Charakteristische Zeitdauern für diese Phase liegen im Bereich von kleiner 2 ms. In diesem Zeitbereich treten auch die oben angeführten Eigenschwingungen infolge der Impulsanregung von Probe und Prüfvorrichtung in Erscheinung. Ist

die Abgrenzung von erstem zu zweitem Bereich eindeutig möglich (vgl. Abbildung 2.16, S. 45 und Abbildung 3.22), zeigen sich bei der Differenzierung von Bereich zwei und drei Probleme.

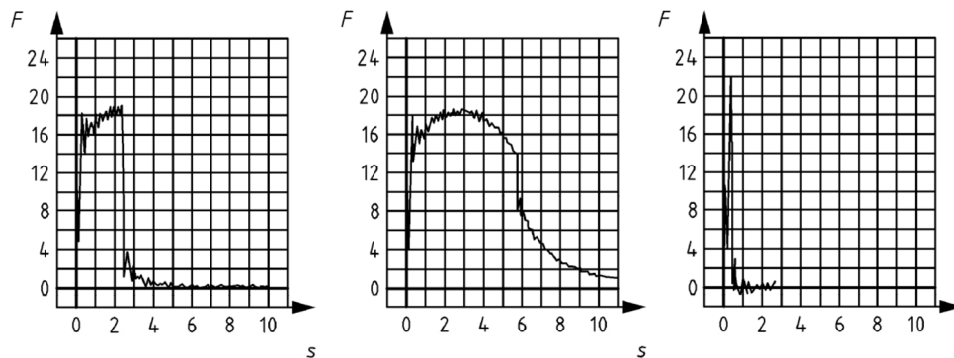


Abbildung 3.24: Zusammengestellt aus „Typische Kraft-Durchbiegung-Kurven und Definitionen von Kraft- und Durchbiegungswerten“ [DIN EN ISO 14556], Abbildung 2

3.6.5 Plausibilitätsprüfung der Messwerte

Zunächst wurde das am Hammerkopf montierte Messsystem auf einer Universalprüfmaschine mit kalibrierter Kraftmessdose (Messbereich 10 kN, Vorkraft 1 % des Messbereichs) quasi-statisch bis zu einer Kraft von 4 kN belastet. Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min. Dieses Vorgehen ermöglicht es zu prüfen, ob die Vorspannung der Kraftsensoren oder der Einbau generell Rückwirkungen auf das Messsignal besitzt. Es zeigt sich, dass im statischen Fall die von den beiden Kraftsensoren (vgl. Abbildung 3.16 und Tabelle 3.7) wiedergegebenen Kraftwerte ca. 15 % unterhalb des kalibrierten Kraftsignals der Prüfmaschine liegen (vgl. Abbildung 3.25). Als Ursache für die Abweichung kann die verhältnismäßig weiche Hammerfinne (Aluminium) angegeben werden. Diese verformt sich bei statischer Belastung und nimmt somit Arbeit auf, die nicht mehr zur Belastung der Sensoren zur Verfügung steht. Bei der eingestellten Versuchsdauer bis zum Erreichen der Maximalkraft wirkt sich der Drift der Sensoren (vgl. Kapitel 3.6.3, S. 85) mit $0,96 \text{ N} / 120 \text{ s}$ vernachlässigbar gering aus. Prinzipiell wäre es möglich anhand der ermittelten Abweichungen über die Sensorbelastung eine Korrekturfunktion für die dynamische Messung anzugeben und die gemessenen Schlagversuche damit zu korrigieren. Dies wird analog im statischen Versuch mit der Maschinenkennlinie durchgeführt (vgl. Kapitel 3.5, S. 78). Der Autor entscheidet sich jedoch gegen eine nachträgliche Korrektur der Messreihen im Schlagversuch, da i) nicht wie im statischen Versuch die Korrekturkurve im eigentlichen Versuchsetup aufgenommen werden kann, ii) damit auch nicht klar ist, ob im Schlagversuch eine ähnliche Abweichung auftritt und iii) die Abweichung zu einer konservativen Schätzung führt, also hin zu leicht geringeren Kraftwerten.

Als weitere Möglichkeit die Messwerte physikalisch auf Plausibilität zu prüfen, besteht die Messung freier Schwingungen des Pendels mit der daran befindlichen Messtechnik. Es kann

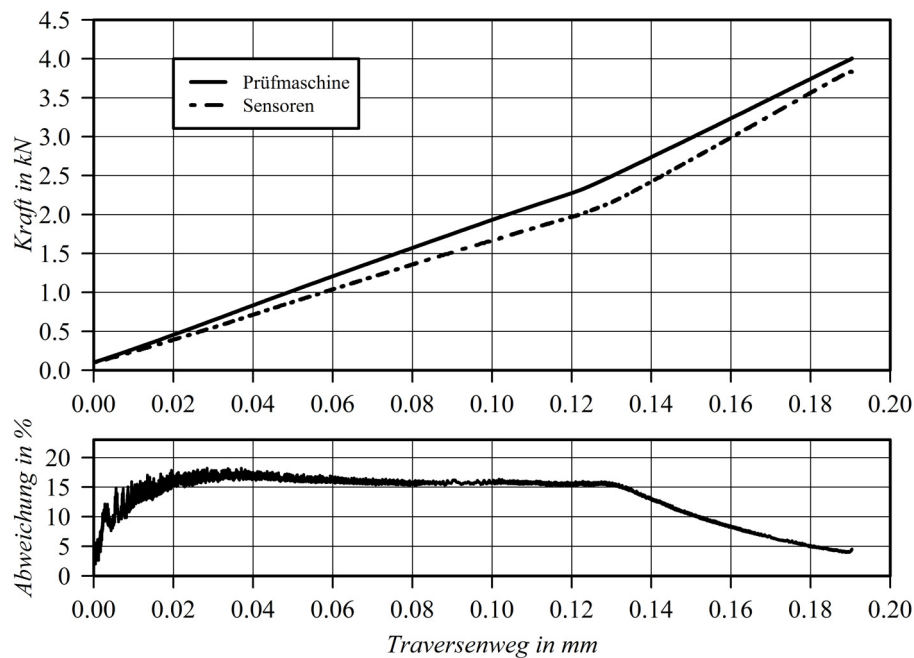


Abbildung 3.25: Statische Referenzmessung der Kraftsensoren im Hammerkopf auf eine Universalprüfmaschine

so theoretisch im eingebauten Zustand die prinzipielle Richtigkeit (Vorzeichen, Phase, Amplitude) der Messwerte geprüft werden. Der Verlauf der Tangentialbeschleunigung bei freien Schwingungen des Pendels entspricht dabei theoretisch dem in Abbildung 3.21, S. 88. Diese Tangentialbeschleunigung wirkt auf die Masse der Hammerfinne. Die resultierende Trägheitskraft der Hammerfinne wird von den Kraftsensoren aufgezeichnet. Darüber hinaus wirkt die Tangentialbeschleunigung in der Achse des Beschleunigungssensors (vgl. Abbildung 3.16, S. 83). So wurden die Kraft- und Beschleunigungssignale, bei freien Schwingungen des Pendels, beginnend in der Auslösehochlage ($\varphi_0 = 160^\circ$, vgl. Abbildung 3.19, S. 86), aufgezeichnet. Der resultierende Beschleunigungsverlauf ist über einer gemeinsamen Zeitachse dargestellt (vgl. Abbildung 3.26). Zunächst sind die Schwingungen des Pendels als zyklische Ereignisse erkennbar. In den ersten $\sim 1,5$ s sind deutliche Überschwingvorgänge als Folge des Rucks beim Auslösen zu beobachten. Im weiteren Verlauf wird deutlich, dass das Beschleunigungssignal in keiner Weise zur Deckung mit dem theoretischen Tangentialbeschleunigungsverlauf kommt. Hierfür können zwei Ursachen genannt werden. Der Beschleunigungssensor hat einen Messbereich von ± 500 g. Maximal können am Pendel ohne Antrieb aber nur 1 g auftreten, was 0,5 % des Messbereichs entspricht. Hinzu kommt, dass der Beschleunigungssensor für dynamische Messungen im Frequenzbereich bis 10 kHz vorgesehen ist (vgl. Tabelle 3.7). Die auftretende Schwingung mit $\sim 0,3$ Hz liegt unterhalb dieser Spezifikation. Die Kombination beider Effekte führt dazu, dass für das Beschleunigungssignal keine Plausibilitätsprüfung möglich ist.

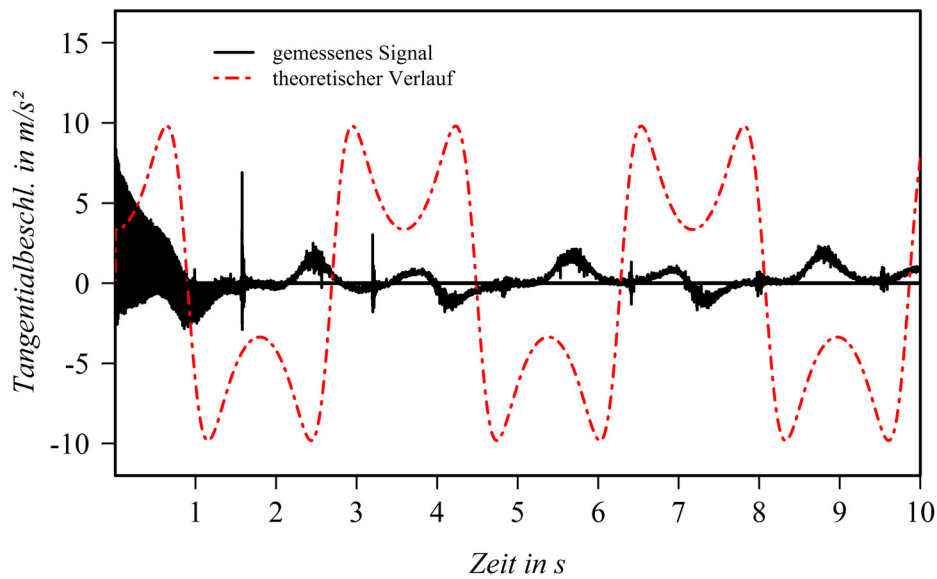


Abbildung 3.26: Bei freien Pendelschwingungen ausgehend von der Auslösehochlage aufgezeichneter Verlauf des gemessenen Beschleunigungssignals und der theoretische Verlauf ermittelt für ein mathematisches Pendel mit den Parametern $r_i = 718$ mm und $\varphi_0 = 160^\circ$, berechnet für den tatsächlichen Abstand von Drehpunkt und Finnenmitte von $r_m = 793$ mm.

Für das bei freien Schwingungen gemessene Kraftsignal liegt der Fall anders (vgl. Abbildung 3.27). Das Signal wurde zunächst mit der auf die Sensoren wirkenden trägen Masse der Hammerfinne ($m_f = 0,069$ kg) in eine Beschleunigung umgerechnet (vgl. Gleichung 3.12).

$$a_{\tan}(t) = F_{\tan}(t) / m_f ; a_{\max} = F_{\max} / m_f \quad \text{Gleichung 3.12}$$

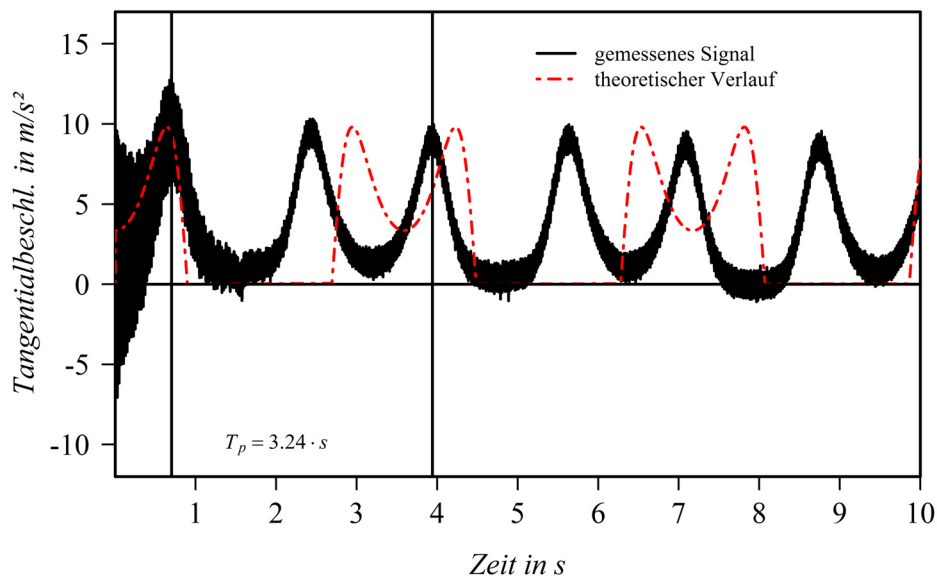


Abbildung 3.27: Bei freien Pendelschwingungen ausgehend von der Auslösehochlage aufgezeichneter Verlauf des gemessenen Kraftsignals mit der Hammerfinnenmasse umgerechnet in einen Beschleunigungsverlauf und der theoretische Verlauf ermittelt für ein mathematisches Pendel mit den Parametern $r_i = 718$ mm und $\varphi_0 = 160^\circ$, berechnet für den tatsächlichen Abstand von Drehpunkt und Finnenmitte von $r_m = 793$ mm.

Es zeigen sich bei genauer Betrachtung des Signalverlaufes im Vergleich mit dem für das mathematische Pendel berechneten Beschleunigungsverlauf drei wesentliche Effekte: i) die Amplitudengleichheit von gemessenem und theoretischem Signal, ii) es treten keine negativen Kräfte nach Abklingen der bereits erwähnten Oberschwingungen auf und iii) eine mit fortschreitender Zeitdauer zunehmende Verschiebung. Letzteres lässt sich durch eine verhältnismäßige hohe Dämpfung des Pendels erklären. In deren Folge nimmt die Periodendauer der Schwingungen rasch ab, was zur Verschiebung gegenüber dem ungedämpften Verlauf des mathematischen Pendels führt. Ursache für die hohe Dämpfung sind Reibverluste die nach Überzeugung des Autors hauptsächlich durch die Schleppkabel der Signalleitungen entstehen (Verkabelung der Sensoren an der Hammerfinne). Für die praktische Messung in der vorliegenden Arbeit ist diese hohe Dämpfung jedoch unbedeutend, da die gemessenen Kraft-Beschleunigungs-Verläufe davon unabhängig sind. Eine kritische Reduzierung des Nennarbeitsvermögens vom Auslösen in der Hochlage bis zum Auftreffen auf der Probe nach ~ 1 s ist ebenso wenig zu erwarten. Der oben genannte Effekt, dass sich das Signal auf den Druckkraftbereich bzw. auf Beschleunigungen in Richtung der Druckkraft beschränkt, zeigt die Funktion der Zugversteifungen (vgl. Abbildung 3.16, S. 83). Diese verhindern effektiv eine kritische Belastung der Druckkraftsensoren. Der zuerst genannte Effekt der Amplitudengleichheit zeigt, dass das Messsystem im eingebauten Zustand verlässliche Werte der Druckkräfte ausgibt. Beachtung finden sollte aber auch hier der Messbereich von wenigen N, in dem bei freier Pendelbewegung gemessen wird. Die Kraftsensoren sind für axiale Druckkräfte von jeweils maximal 20 kN ausgelegt, insofern ist der Rauschabstand auch bei der vorliegenden freien Schwingung recht gering. Gemessen wird nur die Trägheitskraft der Masse der Hammerfinne. Insofern dienen die angeführten Versuche nur der Plausibilitätsprüfung der aufgezeichneten Signale. Eine Kalibrierung des Messsystems wäre nur mit Referenzproben möglich.

3.6.6 Vorversuche zur Beurteilung des Messsystems

Infolge des hochdynamischen Versuchsvorganges beim Schlagversuch, besitzen Eigenschwingungen der Versuchsvorrichtung, wie auch der Probe, wie bereits erwähnt, eine immense Bedeutung für die zeitliche Beschreibung des Bruchvorganges. Ebenso für die Analyse und Interpretation der gewonnenen Daten. An einigen Stellen der Literatur wird auf diese Schwingungsproblematik hingewiesen. Aufschlussreich ist besonders [DIN EN ISO 179-2], da hier dezidiert auf diese Problematik eingegangen wird. *„Durch den Schlag wird das Kraftmesssystem angeregt bei seiner Eigenfrequenz zu schwingen. Die Schwingungsamplitude wird von der Masse und Steifigkeit des Systems abhängen, die wiederum durch die Konstruktion festgelegt werden. Während der Zeit, in der der Kontakt zwischen Hammerschneide und dem Probekörper unterbrochen ist, d. h. nach dem Trägheitsmaximum, können negative Kräfte beobachtet werden, wenn die Amplitude der angeregten Schwingung groß ist und die effektive Masse an dem Kraftmeßgerät 'zieht'.“* [DIN EN ISO 179-2], S. 7.

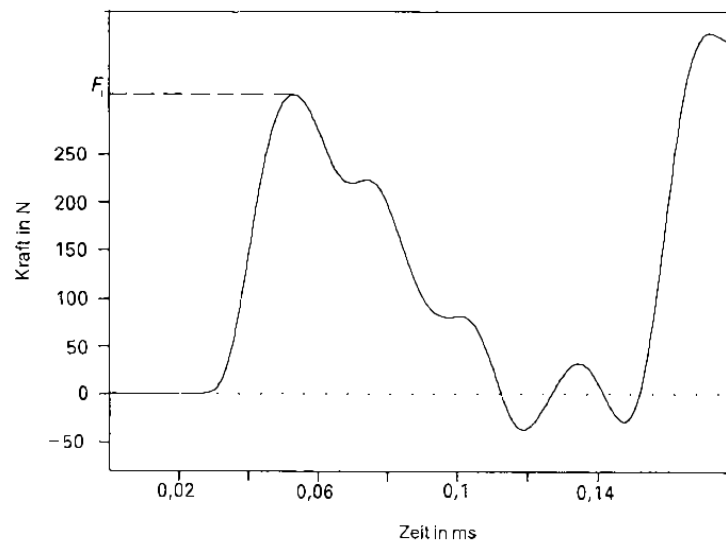


Abbildung 3.28: „Beispiel für eine Kraft-Zeit-Kurve mit einem Trägheitsmaximum“ [DIN EN ISO 179-2], Abbildung A.2

Abbildung 3.28 zeigt ein solches Trägheitsmaximum mit anschließender Schwingungsüberlagerung. Um eine Beurteilung des dynamischen Verhaltens der Prüfeinrichtung während der tatsächlichen Schlagversuche vornehmen zu können, wurden Vorversuche durchgeführt. Hierzu wurden Proben des Werkstoffs OSB-03 (vgl. Tabelle 3.3, S. 72) in Plattenrichtung geprüft. Die Versuchsbedingungen sind vergleichbar mit den der späteren Messreihen, lediglich die Stützweite entsprach noch dem alten System mit 240 mm anstatt der nun für die Probendicke 18 mm mit 216 mm festgelegten Stützweite. In Abbildung 3.29 sind die Messungen, skaliert auf ihre physikalischen Größen, wiedergegeben⁴⁰. Das Trägheitsmaximum, die nachfolgenden lokalen Minima infolge der Eigenschwingungen des Messsystems, sowie der Nulldurchgang in den Zugkraftbereich sind deutlich erkennbar. Bemerkenswert ist die Ähnlichkeit dieses Abschnitts zu dem in der Norm beispielhaft angegebenen Kurvenausschnitt für Kunststoffproben (vgl. Abbildung 3.28). Ebenso wird ein weiterer Effekt deutlich. Bis zum Nulldurchgang der Kraftwerte nach $\sim 0,65$ ms liegen alle Kurven nahe beieinander. Dies kann auf systemimmanente Schwingungen zurückgeführt werden, die sich folglich zwischen den einzelnen Proben nicht wesentlich unterscheiden. Diese hängen hauptsächlich von den Masse- / Steifigkeitsverhältnissen im Messsystem selbst ab. Nach dem Nulldurchgang, Probekörper und Hammerfinne verbleiben nun in Kontakt, erfolgt der eigentliche Bruch. Dieser Bereich ist wesentlich von den individuellen Festigkeiten der Probekörper gekennzeichnet. Letztgenannter Bereich ist offensichtlich auch größeren Schwankungen unterlegen als der erstgenannte (vgl. auch Konfidenzband in Abbildung 3.39, S. 106). Teilweise werden nach dem Nulldurchgang noch hohe Kraftwerte erreicht, teilweise scheint die Probe aber auch schon versagt zu haben und es findet sich nur noch ein zweiter, mit dem Durchziehen der Probe durch die Widerlager erklärbarer Kraftpeak. Es zeigt sich, dass eine

⁴⁰ Bei allen Darstellungen von Kraft-Kurven sind Druckkräfte stets positiv und Zugkräfte negativ angetragen.

Schwingungsanalyse des Systems Pendelstange-Hammerkopf-Probe unerlässlich ist, um aus dem Messsystem resultierende Schwingungen zu identifizieren und ggf. Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

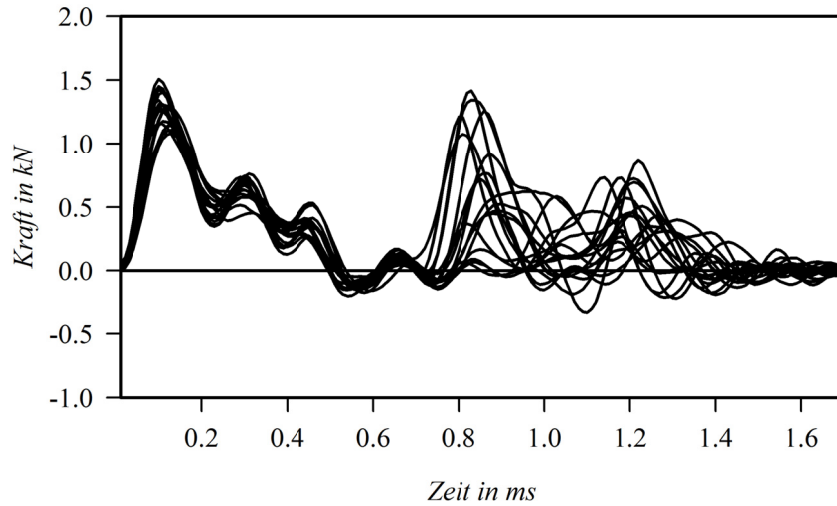


Abbildung 3.29: Kurvenschar einer Vorversuchsmessreihe ($N = 17$) an OSB-03, Belastung in Plattenrichtung

3.6.7 Schwingungsanalyse

Das vorliegende System wird infolge des Schlages beginnen in seinen Eigenformen zu schwingen. Eine stationäre Anregung ist ausgeschlossen. Demzufolge sind zunächst die Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Schwingformen zu bestimmen. Das Schlagpendel lässt sich in verschiedene Baugruppen unterteilen, die einzeln betrachtet, eine effiziente Schwingungsanalyse ermöglichen. Es können zwei Schwingssysteme definiert werden, nämlich i) die Pendelstange mit dem Hammerkopf und ii) der Probekörper (vgl. Abbildung 3.15, S. 81). Zwischen diesen Teilsystemen besteht während des Versuchsablaufs nicht immer Kontakt und zwischen diesen wird (wiederholt) ein Impuls übertragen. Die Eigenkreisfrequenzen ω_i der Probe lassen sich näherungsweise mit Gleichung 3.13 und den werkstoffspezifischen Größen $E_{OSB} = 4.500 \text{ N/mm}^2$, $I_{OSB} = 1/12 \times 18^4 \text{ mm}^4$, $\rho_{OSB} = 0,64 \text{ g/cm}^3$, $A_p = 18^2 \text{ mm}^2$ und $l_w = 240 \text{ mm}$ berechnen. Beispielhaft ist in Abbildung 3.30a zusätzlich zur ersten Eigenfrequenz der Probe von $\omega_1/2\pi = f_1 = 376 \text{ Hz}$ der Kraft-Zeitverlauf $F_{dyn}(t)$ einer Messung an OSB-03 dargestellt. Als Amplitude der Eigenschwingung $F_p(\omega_1, t)$ wurde der Mittelwert der Bruchkraft im statischen Versuch angenommen $F_{BS, mean}$.

[Holzweißig & Dresig 1994], S. 290 f

$$\omega_i = \lambda_i^2 \sqrt{E \cdot I / \rho \cdot A \cdot l^4}, \quad \lambda_1^2 = 9,87$$

Gleichung 3.13

Weiterhin sind in Abbildung 3.30 zwei charakteristische Zeitpunkte $t_0 = 7 \text{e-}5 \text{ s}$ und $t_1 = 4,3 \text{e-}4 \text{ s}$ eingetragen. Dabei kennzeichnet t_0 den Zeitpunkt des Trägheitsmaximums und t_1 den Zeitpunkt des Nulldurchgangs, also den Zeitpunkt in dem Probekörper und Hammerfinne nicht in

Kontakt stehen. Nach Gleichung 3.14 kann überschlägig die Schallgeschwindigkeit im Werkstoff mit $c_{OSB} = 2.652 \text{ m/s}$ und die Zeitdauer $\Delta t = 9\text{e-}5 \text{ s}$ für die Ausbreitung der Strecke Hammerfinne-Widerlager-Hammerfinne berechnet werden.

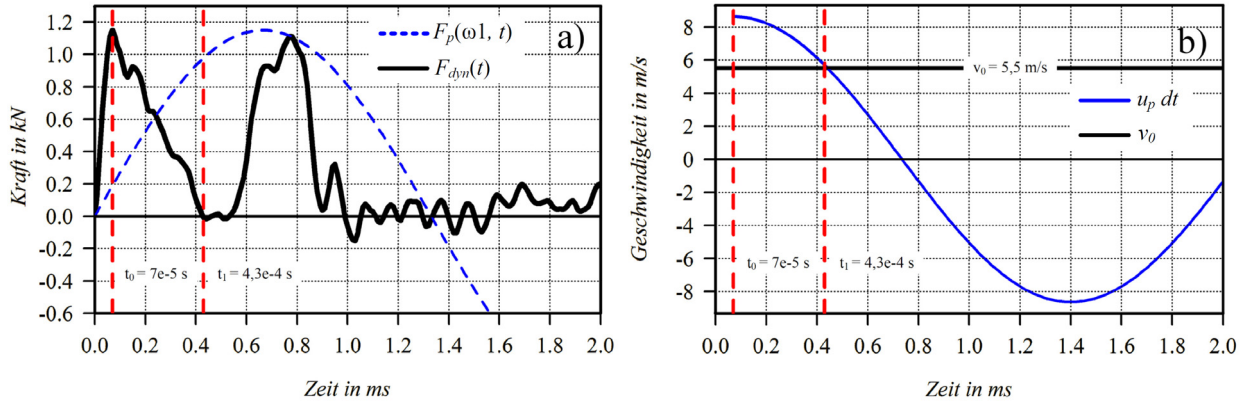


Abbildung 3.30: a) Kraft-Zeit-Verlauf eines Schlagversuchs an OSB-3 in Plattenrichtung und Schwingung der Probe mit der ersten Eigenfrequenz ($\omega_1/2\pi = f_1 = 376 \text{ Hz}$); b) Schwingschnelle der Probe in der ersten Eigenfrequenz und konstante Geschwindigkeit des Hammerkopfes mit der Hammerfinne

$$c_{OSB} = \sqrt{E_{OSB} / \rho_{OSB}}, \quad \Delta t = l_p / c_{OSB} \quad \text{Gleichung 3.14}$$

Es wird deutlich, dass der Zeitpunkt an dem das Trägheitsmaximum t_0 auftritt größenordnungsmäßig mit der Ausbreitungsdauer Δt übereinstimmt. Die erste Eigenfrequenz der Probe ist also verantwortlich für den Abfall der Kraft nach dem Trägheitsmaximum, dessen zeitliches Auftreten wiederum über Werkstoffsteifigkeit und -dichte determiniert wird. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung der Geschwindigkeiten von Hammerfinne (auf der Kreisbahn des Pendels, für die Zeitdauer des Bruchs von 2 ms als $v_0 = \text{konst.} = 5,49 \text{ m/s}$ angenommen) und der Geschwindigkeit des Probekörpers in der Probenmitte $u_p(t)dt$ (vgl. Abbildung 3.30b). Zur Berechnung der Probekörpergeschwindigkeit wird zunächst eine maximale theoretische Durchbiegung $u_{BS,max}$ infolge der angenommenen mittleren Bruchkraft von $F_{BS,mean} = 1,18 \text{ kN}$ nach Gleichung 3.15 berechnet. Diese dient als Amplitude der Sinusschwingung des Probekörpers $u_p(t)$ nach Gleichung 3.16. Die Ableitung der Sinusschwingung der Probe $u_p(t)dt$ gibt die Schwingschnelle der Probenmitte an. Es zeigt sich in Abbildung 3.30b, dass bis zum Zeitpunkt t_1 die Probe schneller ist als die Hammerfinne, d. h. diese der Hammerfinne voran eilt. Was sich wiederum im negativen Gradienten der Kraft in diesem Bereich äußert. Ab dem Zeitpunkt t_1 holt die Hammerfinne die Probe wieder ein. Angezeigt wird dies durch einen erneuten Kraftanstieg bis es schließlich zum Bruch der Probe kommt. Offensichtlich bedingt also die erste Eigenfrequenz der Probe bei den vorliegenden Versuchsbedingungen wesentlich die Charakteristik des Kraft-Zeit-Verlaufes bis zum Bruch. Eine Einflussnahme auf diesen Verlauf ist demzufolge durch Veränderungen des Messsystems nicht möglich.

$$u_{BS,max} = \frac{F_{BS,mean} \cdot l_w^3}{48 E_{OSB} \cdot I_{OSB}} \quad \text{Gleichung 3.15}$$

$$u_p(t) = u_{BS,max} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad \dot{u}_p(t) = u_p(t) dt \quad \text{Gleichung 3.16}$$

Das Schwingsystem Pendelstange mit Hammerkopf besitzt den größten Einfluss auf die von der Messtechnik ausgegebenen Signale, da an diesem die Messtechnik angebracht ist. Es bietet sich folglich an, eine experimentelle Modalanalyse an diesem Schwingsystem durchzuführen, um ggf. kritische Eigenfrequenzen zu identifizieren. Günstig hierfür erweist sich die bereits in die Hammerfinne integrierte Messtechnik. Wird ein kurzer Impuls durch einen harten Schlag in Schlagrichtung des Pendels aufgebracht, können die resultierenden Schwingungen des Systems aufgezeichnet werden. In Abbildung 3.31 ist ein solches Beschleunigungssignal nach einem Anschlag der Hammerfinne dargestellt. Die Spektralanalyse für eine Signaldauer von 10 ms zeigt in den Bereichen um 2 kHz, 10 kHz und 15 kHz drei deutliche schmalbandige isolierte Peaks.

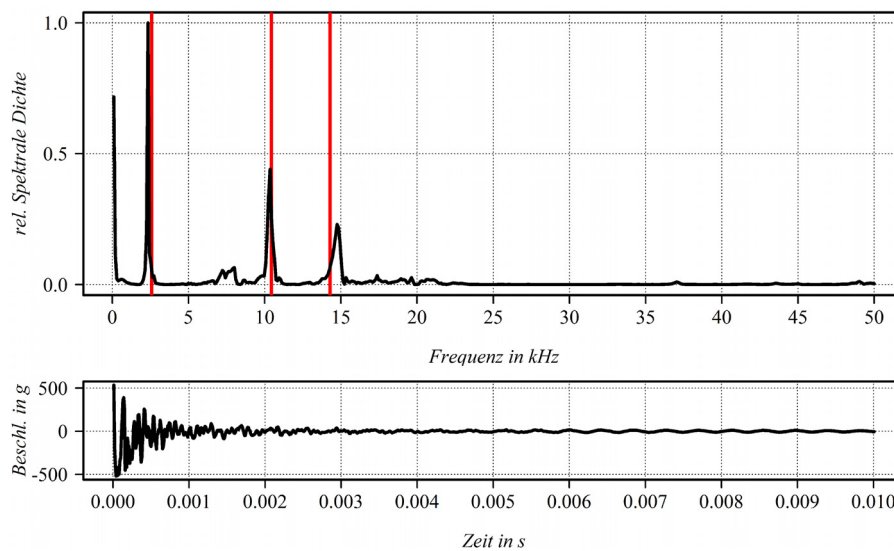


Abbildung 3.31: Oben: Relative spektrale Dichte des Beschleunigungssignals nach dem Anschlag im Frequenzbereich; Unten: aufgezeichnetes Signal im Zeitbereich

Um neben den auftretenden Eigenfrequenzen auch die zugehörigen Schwingformen sichtbar machen zu können, wurde das Schwingsystem in einem vereinfachte FEM-Modelle⁴¹ abgebildet. Die Sensoren werden in diesem durch Ersatzsteifigkeiten⁴² abgebildet. So konnten den Peaks der experimentellen Modalanalyse Eigenformen bei 2,6 kHz, 10,4 kHz und 14,3 kHz zugeordnet werden (vgl. Abbildung 3.33 bis Abbildung 3.35). Bemerkenswert ist vor allem die dritte dargestellte Eigenfrequenz bei 14,3 kHz. Diese zeigt die Biegeschwingung der ersten Eigenform der Hammerfinne. Da bei dieser Schwingform die beiden Kraftsensoren die Stützstellen des Bie-

41 Die FEM Berechnung wurde in ANSYS Workbench 13.0.0 (Academic Research Lizenz) durchgeführt.

42 Ersatzsteifigkeit der Kraftsensoren 1.100 N/μm entsprechend Datenblatt.

gebalkens und somit die Knotenpunkte der Schwingform darstellen, ist es plausibel, dass diese Frequenz in der Spektralanalyse des Kraftsignals nicht auftritt (vgl. Abbildung 3.32).

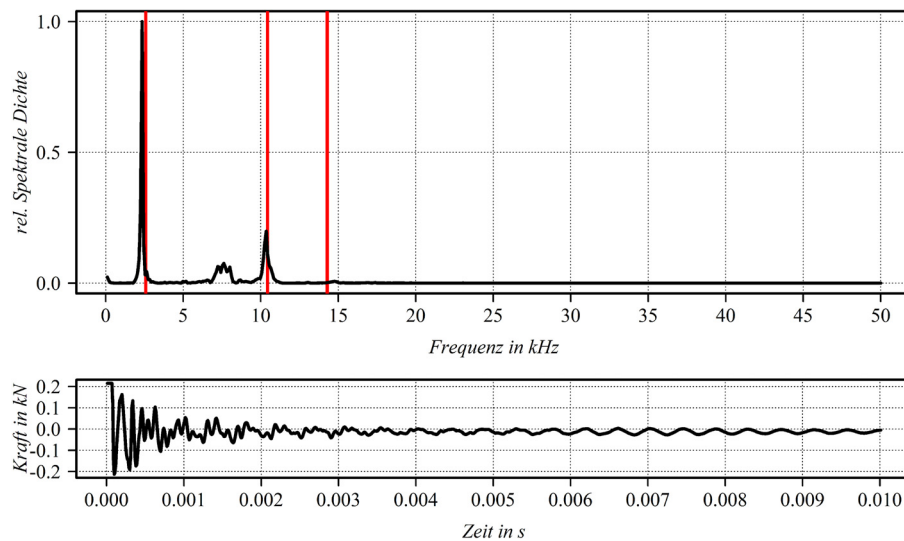


Abbildung 3.32: Oben: Relative spektrale Dichte des Kraftsignals nach dem Anschlag im Frequenzbereich; Unten: aufgezeichnetes Signal im Zeitbereich

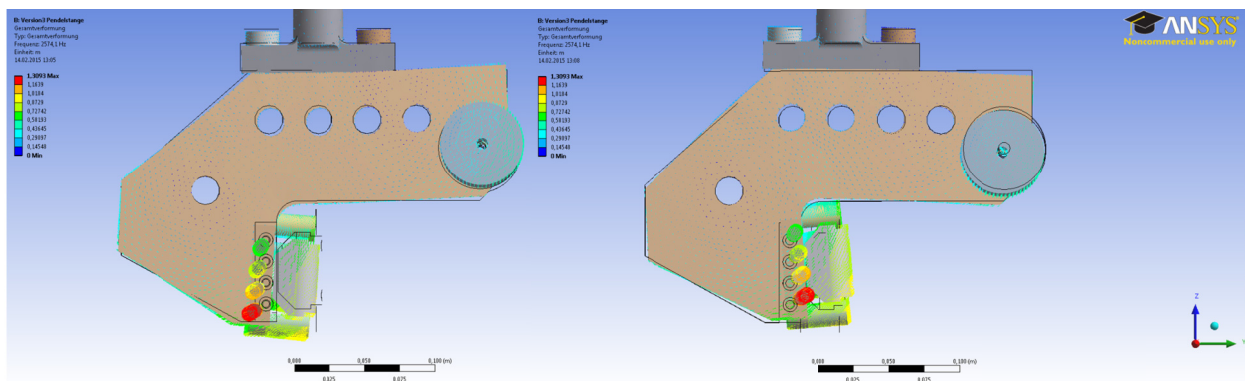


Abbildung 3.33: Eigenform bei 2,574 Hz

Die beiden weiteren identifizierten Frequenzen treten auch hier gleichermaßen auf. Den größten Anteil besitzt in beiden Fällen die Eigenform bei 2,6 kHz. Diese liegt in ihrer Frequenz ungünstig zur Charakteristik und zur Dauer des Bruchversuches (vgl. Abbildung 3.30). Eine mögliche Lösung wäre, den Hammerkopf derart umzugestalten, dass sich keine Eigenformen mit modalen Koordinatenanteil in Schlagrichtung im Bereich von $\sim 0,2$ kHz bis 10 kHz befinden. Aus konstruktiver Sicht ist diese Aufgabe allerdings nicht ohne weiteres lösbar. So wird sich darauf beschränkt, im Nachhinein Frequenzbereiche, in denen Eigenschwingungen des Messsystems auftreten, gezielt mittels Filter aus den Signalen weitgehend zu eliminieren.

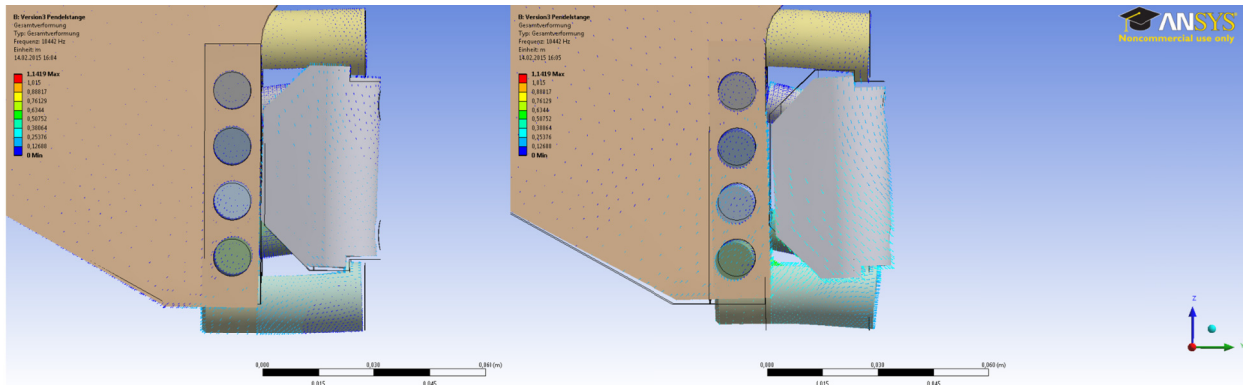


Abbildung 3.34: Eigenform bei 10.442 Hz

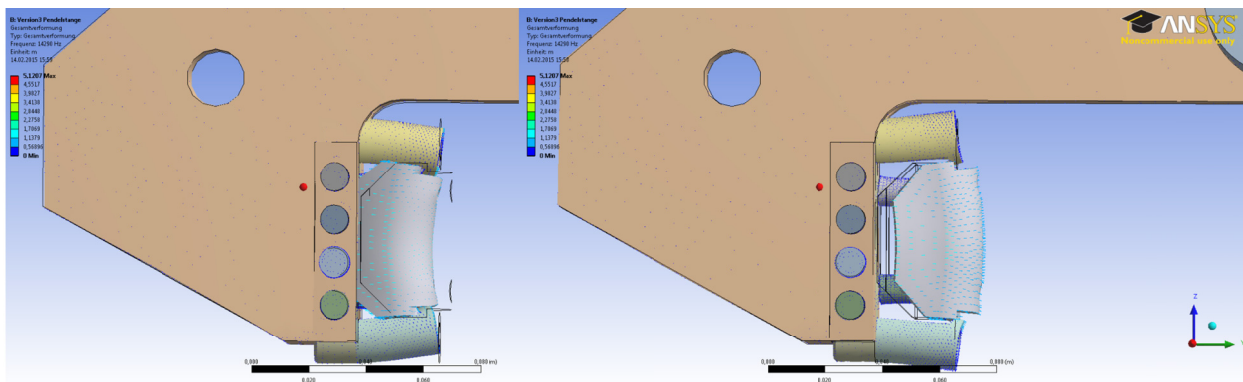


Abbildung 3.35: Eigenform bei 14.290 Hz

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass die Eigenfrequenzen der Proben und des instrumentierten Hammerkopfes in einem ungünstigen Verhältnis zu den zeitlichen Effektgrößen beim dynamischen Bruch der Holzwerkstoffe stehen. Veränderungen an der Geometrie der Probe, um deren Eigenfrequenzen zu verschieben, sind aus methodischen Gründen nicht möglich. Kritische Frequenzbereiche in denen Eigenfrequenzen des Messsystems auftreten werden gefiltert. Abbildung 3.36 zeigt abschließend das realisierte Messsystem.



Abbildung 3.36: Instrumentiertes Schlagpendel für die Prüfung von Holzwerkstoffen (vgl. Abbildung 3.15, S. 81)

3.7 Versuchsplanung

Die in den Kapiteln 3.1 bis 3.6 erarbeiteten Methoden zur Werkstoffprüfung werden im Folgenden zu einem Versuchsprogramm verdichtet. Die Anzahl der Versuche soll, durch die Unterteilung der Versuche in Quer- und Längsschnitt (vgl. Tabelle 3.8), auf ein handhabbares Maß reduziert werden. Zunächst wird ein Querschnitt von Proben aller ausgewählter Werkstoffe (vgl. Tabelle 3.3, S. 72) im Normklima konditioniert und der statischen sowie der Schlagprüfung unterzogen. Es werden Scheiben- und Plattenbelastung in Hauptrichtung der Werkstoffe geprüft (vgl. Kapitel 2.3.1, S. 29). Zielstellung ist es, aus dem statischen Biegeversuch (vgl. Kapitel 3.5, S. 78) heraus Kennwerte abzuleiten, um die im Schlagversuch ermittelten Kennwerte zunächst auf Plausibilität zu prüfen. Aufgrund der Ähnlichkeit beider Versuche und des exakt gleichen Versuchsaufbaus (Proben- und Widerlagergeometrie) ist, zumindest was die Bruchenergien angeht (vgl. Abbildung 2.28, S. 55), die gleiche Größenordnung der Kennwerte aus dem statischen und dem Biegeversuch zu erwarten.

Nachfolgend werden drei Werkstoffe, der OSB-Werkstoff, der SWP-Werkstoff und ein ausgewählter PLY-Werkstoff stellvertretend für ihre Gruppe abweichend konditioniert. Die thermische Belastung mit 105 °C und 200 °C, das trocken / kalte Klima und die Einbringung

konstruktiver Kerben werden als Längsschnitt an diesen untersucht. Die Gruppe der PLY-Werkstoffe wird durch den Werkstoff PLY-BB repräsentiert. Alle Versuche werden unter Belastung in Scheiben- und Plattenrichtung durchgeführt. Die Vorzugsrichtung der Platten, bei PLY und SWP die Faserrichtung, bei OSB die Strandorientierung der Deckschicht, wird stets in Probenlängsrichtung gelegt. Bei einer Stichprobengröße von $N = 10$ wird eine Gesamtzahl von 520 Einzelmessungen erreicht. Der Ablauf der Versuche (vgl. Abbildung 3.37) wird für jedes Prüflos mit einem Prüfprotokoll dokumentiert. In diesem sind sämtliche Probenabmessungen, Gewichte, Klimaparameter und Messgeräteinstellungen vermerkt.

Auf die Prüfung der Eigenschaften in Plattennebenrichtung (sowohl statisch wie auch im Schlagversuch, in der Quer- und Längsschnittmessreihe) wird verzichtet. Diese Entscheidung begründet sich zunächst in der methodisch angelegten Zielstellung der Arbeit. Es gilt die Methoden für die Entwicklung eines Klassenmodells der mechanischen Leistungsfähigkeit im statischen und im Schlagversuch zu entwickeln. Dieses Modell kann gleichermaßen auf Scheiben- und Plattenbelastung in Haupt- und Nebenrichtung angewendet werden. Da in der Regel die Hauptrichtung eines Holzwerkstoffes höhere mechanische Fähigkeiten besitzt als die Nebenrichtung, ist es wahrscheinlich, dass diese Richtung die bevorzugte Einbaurichtung sicherheitskritischer Bauteile darstellt. Der Prüfumfang wird auf ein im Rahmen der Arbeit darstellbares Maß verkleinert. Perspektivisch stellt die ergänzende Prüfung der Nebenrichtung der Werkstoffe einen Anknüpfungspunkt für weitere Arbeiten dar.

Tabelle 3.8: Versuchsmatrix und Prüfbedingungen der durchzuführenden Versuche

		Zu untersuchende Werkstoffe						
Kurzzeichen*		OSB-03	PLY-PO	PLY-ID	PLY-BB	PLY-RP	PLY-KQ	SWP-3F
Konditionierung		Querschnittmessreihe						
65 ± 5 % RH 20 ± 2 °C	SSU/SPU-nk	x	x	x	x	x	x	x
65 ± 5 % RH 20 ± 2 °C	DSU/DPU-nk	x	x	x	x	x	x	x
		Längsschnittmessreihe						
Darrtr. 0 % RH 105 °C Rekl. 65 ± 5 % RH 20 ± 2 °C	DSU/DPU-r1	x			x			x
Darrtr. 0 % RH 200 °C Rekl. 65 ± 5 % RH 20 ± 2 °C	DSU/DPU-r2	x			x			x
Sägekerb / 65 ± 5 % RH 20 ± 2 °C	DSK/DPK-nk	x			x			x
15 ± 5 % RH 17 ± 2 °C	DSU/DPU-r3	x			x			x
* <u>S</u> tatisch/ <u>D</u> ynamisch ⁴³ - <u>S</u> cheibe/ <u>P</u> latte - <u>U</u> ngekerbt/ <u>K</u> erb – <u>n</u> orm <u>k</u> lima/Klimazustand <u>r1</u> - <u>r3</u>								

⁴³ Da die Bezeichnungen „statisch“ und „schlagartig“ für die Versuchsbezeichnung beide mit dem Buchstaben „S“ beginnen, wird im folgenden der Schlagversuch im Kurzzeichen der Prüfkostenbezeichnung mit „D“ für dynamische Prüfung geführt.

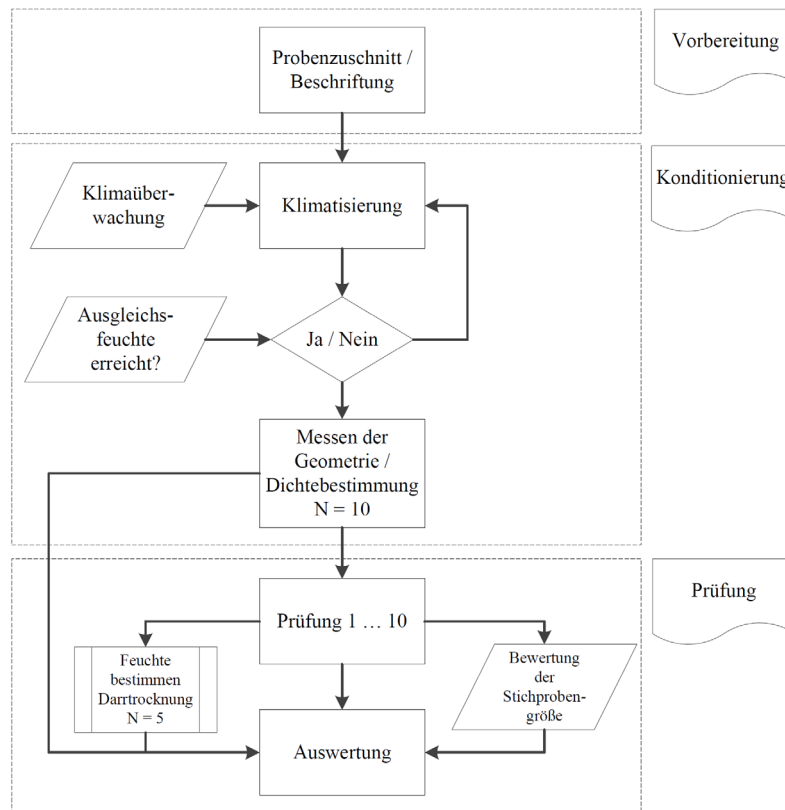


Abbildung 3.37: Ablauf des Prüfprozesses mit den Teilprozessen Probenvorbereitung, Konditionierung und Prüfung

3.8 Prüfung auf ausreichende Stichprobengröße

„Wenn nichts anderes in der Norm für den zu untersuchenden Werkstoff festgelegt ist, müssen 10 Probekörper geprüft werden. Wenn der Variationskoeffizient (siehe ISO 2602) unter 5 % liegt, reicht eine Anzahl von mindestens 5 Probekörpern aus.“ [DIN EN ISO 179-1] S.10. Die Auswahl der zu prüfenden Losgröße N ist stets subjektiv begründet. Die Aussage, ob eine Stichprobe ausreichend groß ist, wird anhand des Erreichens bestimmter subjektiv festgelegter Grenzwerte gebunden, so wie oben an einen Variationskoeffizient der Brucharbeit kleiner 5 %. Diese Grenzwerte sind Streumaße (z. B. Variationskoeffizient) bestimmter Größen (z. B. Brucharbeit). In der vorliegenden Arbeit wird ein alternativer Weg zur Prüfung auf ausreichende Stichprobengröße beschritten. Im Vorfeld der Untersuchungen ist nicht bekannt, welche Kennwerte aus den aufgezeichneten Kraft-Zeit-Diagrammen (des statischen und des Schlagbiegeversuchs) ermittelt werden können. Ebenso wenig ist bekannt welchen Verteilungen diese unterworfen sind. Bekannt ist aber, dass mehrere Größen ermittelt werden. Dies führt in ein Dilemma, da bei verschiedene Größen mit verschiedenen Streumaßen theoretisch verschiedene Stichprobengrößen resultieren. Eine eindeutige Entscheidung ist so nicht möglich. Aus den genannten Gründen scheiden also Verfahren zur Schätzung der Stichprobengröße⁴⁴ aus, die sich auf

44 Vergleich z. B. [Israel 1992]

einzelne aus dem Kurvenverlauf ermittelte Größen (z. B. die Maximalkraft oder E-Modul) und deren Streumaße beziehen. Es ist vielmehr notwendig ein Verfahren zu finden, welches sich auf die Charakteristik, den gesamten Verlauf des Kraft-Zeit-Diagramms, bezieht (vgl. Abbildung 2.16). [Lenhoff, Santner, Otis, Peterson, Williams & Backus 1999] wenden Prädiktions- und Konfidenzbänder (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) in Verbindung mit Bootstrapping-Verfahren an kinematischen Größen des menschlichen Gangzyklus an. Mithilfe dieses Verfahrens ist es möglich, ausgehend von wiederholten Messungen, für eine erneute Messung ein Prädiktionsband anzugeben, in dem diese mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit liegt (vgl. Abbildung 3.38). Eine Adaption des Verfahrens wird zur Einschätzung der Stichprobengröße eingeführt. Das Kriterium nach dem diese bewertet wird ist die Homogenität der Stichprobe. Homogenität bezeichnet hier nicht unbedingt nur das nahe Beieinanderliegen aller Kurven, sondern auch die Konvergenz des Bandes um alle gemessenen Kurven mit zunehmender Stichprobengröße. Somit kann ausgesagt werden, dass ein ausreichend gutes Abbild der Grundgesamtheit insofern vorliegt, das neu gemessene Kurven das konvergente Band nicht mehr verändern und somit keine neue Charakteristik hinzukommt – also die Stichprobe ausreichend groß ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Grundgesamtheit an Möglichkeiten des Erscheinungsbildes des charakteristischen Kurvenverlaufes mit zunehmender Stichprobengröße immer vollständiger mit dem Konfidenzband abgebildet wird. Im Gegenzug kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine neu gemessene Kurve innerhalb eines aus der Stichprobe gebildeten Prädiktionsbands liegt, mit zunehmender Stichprobengröße steigt.

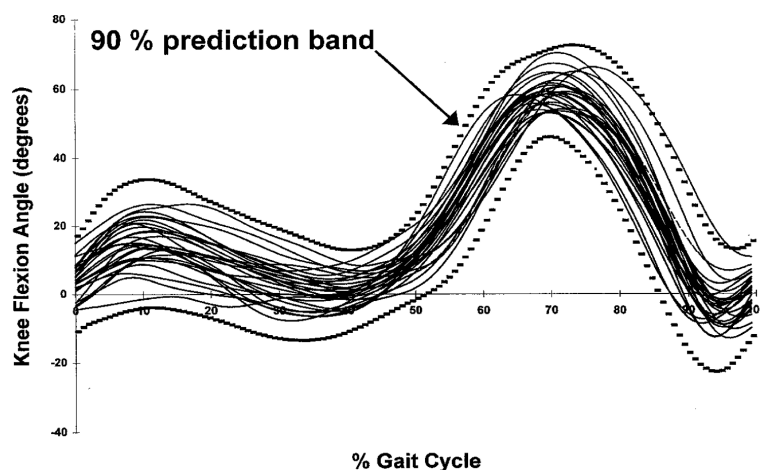


Abbildung 3.38: „Knee flexion angle versus percent gait cycle for 28 normal subjects, with a 90% bootstrap prediction band.“ [Lenhoff et al. 1999], Abbildung 4

Mittels Bootstrapping und Kreuzvalidierung (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) ermittelt das entwickelte Verfahren, zu wie viel Prozent eine zufällig ausgewählte Kurve, im Mittel, in einem Konfidenzband um eine Mittelwertkurve der Stichprobe liegt. Wird die Stichprobengröße erhöht, steigt der Anteil der Fläche, der innerhalb des durch die Stichprobe aufgespannten Konfidenzbandes liegt. Dieser Wert konvergiert mit zunehmender Stichprobengröße zu 100 %. Die Fläche, die außerhalb des Konfidenzbandes liegt, fällt mit zunehmender Stichprobengröße und konvergiert

gegen 0 %. Das Konvergenzniveau bei einer bestimmten Stichprobengröße gibt so ein Maß für die Repräsentation der zugrunde liegenden Vielfalt an. Dieses Maß kann zum Vergleich der Repräsentativität der Messreihen herangezogen werden. Weisen die verschiedenen Prüflose der Größe N ein vergleichbares Konvergenzniveau auf, ist die Qualität deren Aussage über die Grundgesamtheit ebenso vergleichbar. Das Verfahren selbst basiert auf wiederholtem Ziehen mit Zurücklegen einzelner Kurven aus der Stichprobe. So werden aus der vorhandenen Stichprobe (im Vorversuch $N = 17$) n Kurven zufällig (Ziehen mit Zurücklegen) ausgewählt (vgl. Gleichung 3.17). Für alle in der Arbeit durchgeführten Messreihen wird die Stichprobengröße in Anlehnung an die eingangs genannte Norm mit $N = 10$ festgelegt.

$$n = \{2, 3 \dots (N - 1)\} \quad \text{Gleichung 3.17}$$

Aus der Kurvenschar F_n wird das Konfidenzband $CB_{n,z}$ (vgl. Abbildung 3.39) berechnet. Zunächst erfolgt dazu die Berechnung diskreter Konfidenzintervalle für jeden der insgesamt i_{ges} Zeitpunkte t_i der Kurve. Dazu werden die Konfidenzintervalle $CI_{n,z}(t_i)$ der Größe $2 \cdot z \cdot SD_n(t_i)$ symmetrisch um die Mittelwerte $\bar{F}_n(t_i)$ aus den n ausgewählten Kurven zu den Zeitpunkten t_i bestimmt (vgl. Gleichung 3.18). Die Größe des Konfidenzintervalls wird als Vielfaches z der Standardabweichung angegeben⁴⁵. Die Aneinanderreihung der Konfidenzintervalle (vgl. Gleichung 3.19) ergibt so das Konfidenzband nach Gleichung 3.20.

$$SD_n(t_i) = \sqrt{\frac{1}{j-1} \sum_{j=1}^n (\bar{F}_n(t_i) - F_j(t_i))^2}, \quad \bar{F}_n(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j(t_i), \quad i = \{1, 2 \dots i_{ges}\} \quad \text{Gleichung 3.18}$$

$$CI_{n,z}(t_i) = [\bar{F}_n(t_i) - z \cdot SD_n(t_i), \bar{F}_n(t_i) + z \cdot SD_n(t_i)] \quad \text{Gleichung 3.19}$$

$$CB_{n,z} = [\bar{F}_n - z \cdot SD_n, \bar{F}_n + z \cdot SD_n] \quad \text{Gleichung 3.20}$$

Eine nicht für die Berechnung des Konfidenzbandes genutzte, zufällig aus den $k = (N - n)$ verbliebenen Kurven ausgewählte Kontrollkurve F_k dient zur Validierung (vgl. Kapitel 3.9, Kreuzvalidierung). Für diese werden die Flächenanteile $A_{out}(n, z)$ bestimmt, die außerhalb des Konfidenzbandes liegen (vgl. Gleichung 3.21 bis Gleichung 3.24). Ebenso wird die Fläche des Konfidenzbandes nach Gleichung 3.25 berechnet.

⁴⁵ Bei einer Standardnormalverteilung liegen im Bereich $\mu \pm 1,96 \sigma$ 95 % der Werte ($z = 1,96$)

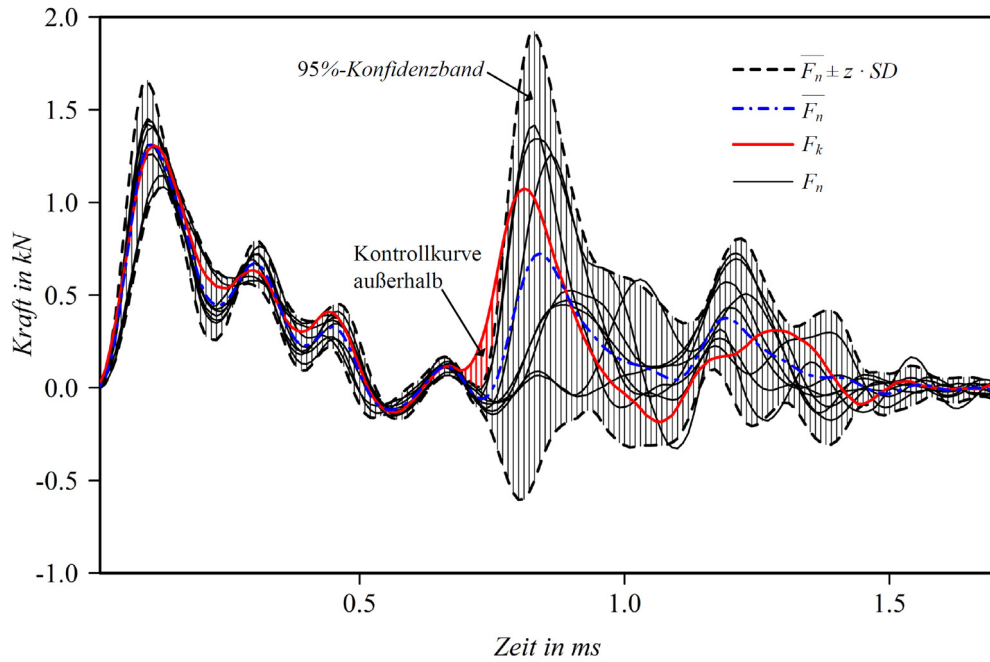


Abbildung 3.39: Vorversuche an OSB-03 bei Plattenbelastung, Beispielhafte Darstellung zufällig ausgewählte Messungen F_n ($n = 1 \dots 13$), 95 %-Konfidenzintervall ($z = 1,96$), Mittelwerte, zufällig ausgewählte Kontrollkurve F_k . Deutlich zu erkennen: um 0,7 ms liegen Werte der Kontrollkurve außerhalb des Konfidenzbandes.

$$\Delta t_v = \Delta t_w = \Delta t_i = 1e-5 s \quad \text{Gleichung 3.21}$$

$$A_{out,o}(n, z) = \sum_{v=1}^{v_{ges}} (F_k(t_v) - [\overline{F_n}(t_v) + z \cdot SD_n(t_v)]) \cdot \Delta t_v$$

$$t_v := \{t_v \in t_i | F_k(t_i) > (\overline{F_n}(t_i) + z \cdot SD_n(t_i))\}$$

Gleichung 3.22

$$A_{out,u}(n, z) = \sum_{w=1}^{w_{ges}} ([\overline{F_n}(t_w) + z \cdot SD_n(t_w)] - F_k(t_w)) \cdot \Delta t_w$$

$$t_w := \{t_w \in t_i | F_k(t_i) < (\overline{F_n}(t_i) - z \cdot SD_n(t_i))\}$$

Gleichung 3.23

$$A_{out} = A_{out,o} + A_{out,u} \quad \text{Gleichung 3.24}$$

$$A_{CB}(n, z) = \sum_{i=1}^{i_{ges}} (\overline{F_n}(t_i) + z \cdot SD_n(t_i)) - (\overline{F_n}(t_i) - z \cdot SD_n(t_i)) \cdot \Delta t_i$$

Gleichung 3.25

Das Verhältnis $P_{n,z}$ gibt so relativ zur Fläche des Konfidenzbandes den Anteil an Kurvenfläche an, der außerhalb des Bandes liegt (vgl. Gleichung 3.26). Für jedes n wird dieser Anteil mehrfach mit zufällig gewählten Kurven F_n und der Kontrollkurve F_k berechnet. Die Anzahl der Iterationen wird mit $n_{it} = 1e4$ Durchläufen festgelegt.

$$P_{n,z} = \frac{A_{out}(n, z)}{A_{CB}(n, z)} \quad \text{Gleichung 3.26}$$

Die größtmögliche Anzahl an verschiedenen Kombination $K_{N,n}$ der Kurven der Vorversuche liegt bei $K_{N,n} \approx 6e8$ (vgl. Gleichung 3.27) mit $n_{max} = 16$ und $N=17$. Bei den in der Arbeit durchgeführten Messungen der Stichprobengröße $N = 10$ beträgt die Anzahl der möglichen Kombinationen von $n_{max} = 9$ Kurven $K_{N,n} \approx 5e4$. Mit dem gewählten Ausschnitt, aus der Zahl der möglichen Kombinationen, lässt sich eine ausreichend genaue Aussage zur Lage und Verteilung von $P_{n,z}$ treffen.

$$K_{N,n} = \binom{N+n-1}{n} \quad \text{Gleichung 3.27}$$

Das dargestellte Verfahren auf die Vorversuchsmessreihe (vgl. Abbildung 3.29, S. 58) angewendet, resultiert in Abbildung 3.40. Es zeigt sich der konvergente Verlauf von $P_{n,z}$ mit zunehmender Größe von n . Die dargestellten Boxplots geben die Verteilung der $1e4$ Bootstrap-Wiederholungen für die jeweilige Prüflosgröße n wieder. Die Existenz eines konvergenten Verhaltens mit zunehmender Stichprobengröße einerseits (vgl. Abbildung 3.40) und die charakteristische Form des Konfidenzbandes andererseits (vgl. Abbildung 3.39) kann als Indiz für einen, wiederum charakteristischen, Kurvenverlauf gewertet werden. Die in der Normung angegebene und für die Messreihen in dieser Arbeit festgelegte Stichprobengröße von $N=10$ ist ausreichend. Häufigere Messungen führen nicht zu einer wesentlichen Veränderung des Konfidenzbandes. Es kann also davon ausgegangen werden, dass mit dieser Stichprobengröße die Grundgesamtheit ausreichend repräsentiert wird. Zum Vergleich des Repräsentationsgrades der verschiedenen Messreihen wird $P_{n,z}$ für alle Messreihen bestimmt. Treten zwischen den Werten der Messreihen große Abweichungen auf, kann davon ausgegangen werden, dass die Repräsentation der Grundgesamtheit nicht vergleichbar ist. Abschließend sei bemerkt, dass sich das entwickelte Verfahren zur Einschätzung der Stichprobengröße universell für verschiedenste Versuche eignet.

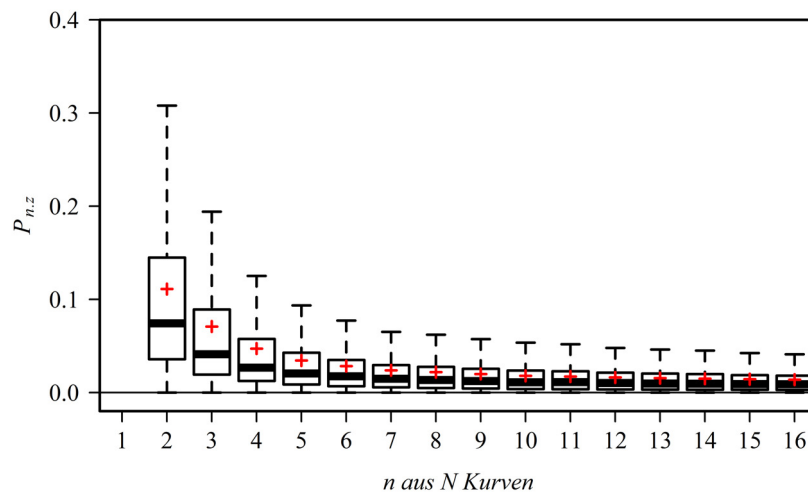


Abbildung 3.40: Anteil der Fläche außerhalb des Konfidenzbandes $P_{n,z}$, für $z = 1,96$ und $n = 2 \dots 16$ (auf die Darstellung der Ausreißer wird aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet)

3.9 Verwendete analytische und statistische Methoden

Methoden und Verfahren analytischer und statistischer Art, deren Erwähnung in gesonderten Kapiteln nicht gerechtfertigt scheint, sollen im Folgenden zentral vorgestellt werden. Auf allgemein bekannte Verfahren wird an dieser Stelle nicht eingegangen. In Teilen wird auch auf die später stattfindende Datenanalyse und statistischen Auswertung vorgegriffen. Andere Abschnitte beziehen sich auf bereits im Methodenteil durchgeführte Berechnungen. Die programmtechnische Umsetzung aller mathematischen Berechnungen findet in der Entwicklungsumgebung **R**⁴⁶ statt.

„Roughly, the **bootstrap** assesses the relationship between the true population and the sample by studying the relationship between the 'given curves' treated as a pseudo-population and pseudo-samples drawn from these curves [6]. It uses the variability in the pseudo-samples to gauge the variability in samples that might be drawn from the true population and the location of center of the pseudo-population as an indicator of the location of the center of the true population.“ [Lenhoff et al. 1999]. Mit anderen Worten kann, durch wiederholtes Ziehen mit Zurücklegen („Samplen“) aus einer gegebenen Stichprobe, vorausgesetzt diese ist repräsentativ, auf die Lage und Verteilung der Grundgesamtheit, der diese Stichprobe entnommen wurde, geschlossen, diese „simuliert“ werden.“ „The variability and mean of many such samples bears the same relation to the population of the N original curves as do the N original curves to the underlying population.“ [Lenhoff et al. 1999]. Somit ist das Verfahren der Inferenzstatistik zuzuordnen⁴⁷. **Kreuzvalidierung** bezeichnet die Methode, aus einer vorhandenen Stichprobe eine Kurve zufällig auszuwählen, die als Kontrollkurve dient. Aus der verbliebenen Kurvenschar kann ein Prädiktionsband berechnet werden und geprüft werden ob die Kontrollkurve in diesem liegt (vgl. Abbildung 3.41).

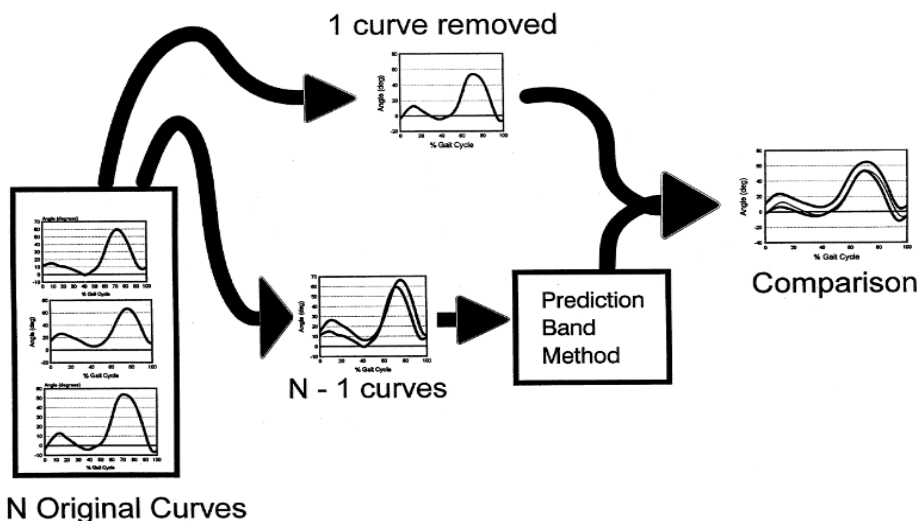


Abbildung 3.41: „Schematic illustration of the cross-validation method. ...“ [Lenhoff et al. 1999], Abbildung 5

46 „The R Project for Statistical Computing“ vgl. [R-Foundation 2015]

47 Vgl. auch [Efron 1979] und [Boos & Stefanski 2013], Kapitel 11

Konfidenzintervalle geben den Bereich an, in dem, mit einer definierten Wahrscheinlichkeit, der wahre Wert der Grundgesamtheit liegt. **Konfidenzbänder** können durch die Aneinanderreihung von Konfidenzintervallen gebildet werden. Das entstehende Band kann jedoch nicht mit einer simultanen Wahrscheinlichkeit für die Lage der wahren (Mittelwert-) Kurve der Grundgesamtheit gleichgesetzt werden. Für die Berechnung simultaner Bänder existieren weiterführende Methoden, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Prädiktionsintervalle geben den Bereich an, in dem, mit einer definierten Wahrscheinlichkeit, eine neue Messung aus der Grundgesamtheit liegt. **Prädiktionsbänder** verhalten sich zu Prädiktionsintervallen genau wie im vorgenannten die Konfidenzbänder zu den Konfidenzintervallen. Oder mit anderen Worten „... *confidence bands for a mean curve of population or prediction bands for a new curve drawn from the same population as the original data.*“ [Lenhoff et al. 1999]. Der **Boxplot** dient der übersichtlichen Darstellung von Lage- und Streumaßen ermittelter Kennwerte einer Stichprobe. Er ist ein Mittel der deskriptiven Statistik. Besonders günstig ist die normierte und gleichzeitige Darstellung von Lage- und Streumaßen die es dem Betrachter ermöglicht einen Überblick über die Datenlage zu erlangen. „*Its purpose is threefold: detection of outliers, and displaying heterogeneity of distribution and effects of explanatory variables.*“ [Zuur, Ieno & Meesters 2009], S. 137. In der vorliegenden Arbeit wird der Boxplot stets um den Mittelwert der Stichprobe ergänzt. Alle anderen Maße entsprechen stets der angegebenen Konvention (vgl. Abbildung 3.42). Der Boxplot kann als ein Mittel zur **Effektgrößenschätzung** genutzt werden. Überschneiden sich bei zwei Messungen die Boxen - d. h. der **Interquartile Range (IQR)** - nicht, liegen mindestens 75 % der Messwerte in zwei voneinander getrennten Bereichen. In diesem Fall kann von einem deutlichen Effekt im Sinne unterschiedlicher Ergebnisse gesprochen werden. Zur Berechnung der **Quantile** einer Stichprobe stehen in R neun verschiedene Algorithmen zur Verfügung (vgl. [GnuR_q 2015]). Es wird der standardmäßig implementierte Algorithmus (Type 7) verwendet. Dieser ist identisch zu dem in Excel implementierten Algorithmus.

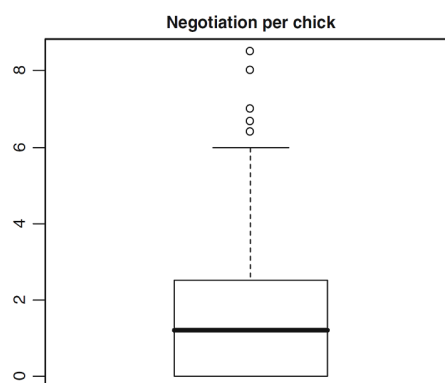


Abbildung 3.42: „Fig. 7.4 Boxplot of owl nestling negotiation. The thick horizontal line is the median; the box is defined by the 25th and 75th percentiles (lower and upper quartile). The difference between the two is called the spread. The dotted line has a length of 1.5 times the spread. (The length of the line pointing up is shorter if the values of the points are smaller than the 75th percentile+1.56 spread, and similar for the line pointing downwards. This explains why there is no line at the bottom of the box.) All points outside this range are potential outliers. See Chapter 4 in Zuur et al. (2007) for a discussion of determining if such points are indeed outliers. Note that in this case the 25th percentile is also the smallest value (there are many zero values)“ [Zuur et al. 2009], Abbildung 7.4, S. 138

Die **Filterung** der Daten ist in dieser Arbeit in zwei Bereichen notwendig. Zum einen werden die Klimadaten mit verschiedenen Glättungsintervallen versehen (vgl. Kapitel 3.1.1, S. 63). Dazu wird ein Moving-Average-Filter genutzt (vgl. [GnuR_rm 2015]), der das Umgebungsklima über ein bestimmtes Zeitfenster mittelt. Zum anderen werden aus den Daten des Schlagversuchs Eigenfrequenzen des Messsystems mit Bandstop bzw. Lowpass gefiltert (vgl. Kapitel 4.3.2, S. 120). Hierzu wird ein Butterworth-Filter fünfter Ordnung genutzt (vgl. [GnuR_bwf 2015]). Der Butterworth-Filter wird genutzt, da dieser kein Brummen im Stopband aufweist. Das **Bestimmtheitsmaß** R^2 gibt an, wie viel Prozent der Varianz durch die lineare Regression erklärt wird. In der vorliegenden Arbeit wird stets das korrigierte Bestimmtheitsmaß genutzt (vgl. [GnuR_ars 2015]). Dieses berücksichtigt die Anzahl der Freiheitsgrade des Modells (lineare Regression $n_{fg} = 1$) und die Anzahl der Einzelmessungen ($N = 10$). Zur Beurteilung inwiefern eine Korrelation vorhanden ist, also in welchen Maß das Modell die Daten erklärt, wird die folgende Vereinbarung getroffen: i) $R^2 < 0,5$ unkorreliert, ii) $0,5 < R^2 < 0,8$ mäßig bis deutlich korreliert und iii) $R^2 > 0,8$ stark korreliert.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Einführung und Überblick

Entsprechend der Aufgabenstellung (vgl. Kapitel 2.9, S. 59) sind Kennwerte aus dem statischen Biegeversuch und dem Schlagversuch zu ermitteln, die: i) eine Differenzierung der Werkstoffcharakteristik und ii) den Vergleich zwischen beiden Versuchsarten ermöglichen. An diesen Kennwerten sollen auch Einflüsse von Klimazustand und Kerbwirkung dahingehend beurteilt werden, ob diese einer Nutzung in sicherheitsrelevanten Einsatzfällen in der Produktionstechnik / dem Maschinenbau entgegenstehen. Schließlich können den Kennwerten Eingangsgrößen für das Klassenmodell der Holzwerkstoffe abgeleitet werden. Die Aufgabe besteht zunächst darin, aus den in den Versuchen (statisch und schlagartig) aufgezeichneten Zeitreihen von Kraft und Verformung Kennwerte herauszubilden, die die genannten beiden Punkte der Differenzierung und des Vergleichs ermöglichen (vgl. Kapitel 4.3, S. 116). Daran anschließend werden die charakteristischen Werte der Kennwerte aus den Querschnittversuchen angegeben (vgl. Kapitel 4.4, S. 126). Diese Kennwerte dienen dann dem Vergleich zwischen statischer und schlagartiger Belastung. Der Vergleich erfolgt anhand von Korrelationen der Kennwerte. Weiterhin werden Kennwerte aus den Versuchen zur thermischen Schädigung und zur Kerbwirkung der Längsschnittversuche bestimmt (vgl. Kapitel 4.5, S. 144). Für alle Prüfkategorien wird eine Bewertung der Stichprobengröße vorgenommen und diese zwischen den einzelnen Messreihen verglichen (vgl. Kapitel 4.6, S. 151). Abschließend wird aus den ermittelten charakteristischen Werten der bezogenen Größen ein Modell zur integralen Klassifizierung der mechanischen Leistungsfähigkeit der Holzwerkstoffe abgeleitet (vgl. 4.8, S. 154).

4.2 Versuchsdurchführung und Angaben zur Probenkonditionierung

4.2.1 Querschnittsmessreihe

Es wurden insgesamt 140 statische Versuche und 140 Schlagversuche an sieben verschiedenen Werkstoffen (ein OSB, ein SWP und fünf PLY) durchgeführt (vgl. Tabelle 3.8, S. 102). Jeweils 10 Proben wurden bei Scheiben- und Plattenbelastung geprüft. Die Versuchsparmeter wurden entsprechend Kapitel 3.1, S. 63 bis Kapitel 3.3 eingestellt. Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 geben eine zusammengefasste Übersicht der Dichte und Ausgleichsfeuchte der einzelnen Prüfkategorien. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Konditionierung zwischen den beiden Querschnittsmessreihen, lediglich bei OSB-03 und PLY-RP unterscheidet sich die Ausgleichsfeuchte um mehr als 1%. Für jede Werkstoff-Belastungsrichtung-Kombination wurden die charakteristischen Bruchbilder aufgenommen (vgl. Abbildung 4.1). Es zeigt sich im Vergleich der Charakteristiken zwischen beiden Messreihen kein erkennbarer Unterschied in der Bruchausprägung. Die Bruchbilder gliedern sich optisch in zwei Kategorien i) verhältnismäßig glatte, stufige und kurzfasrige Brüche (OSB-03 & PLY-PO) und ii) verhältnismäßig langfasrige Brüche (PLY-BB, PLY-ID, PLY-KQ, PLY-RP und SWP-3F).

Tabelle 4.1: Übersicht über Dichte und Feuchte der Proben der statischen Biegeversuche

Klimatisierung bei $\vartheta_U = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und $\varphi_U = (65 \pm 5) \%$ relative Luftfeuchte Belastungsgeschwindigkeit 10 mm / min Aspektverhältnisse: $\lambda_p = 15$, $\lambda_w = 12$							
Werkstoff	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm ³	Feuchtegehalt** in %	Werkstoff	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm ³	Feuchtegehalt** in %
OSB-03	SPU-nk	0,61 ± 0,03	8,41 ± 0,16	PLY-PO	SPU-nk	0,46 ± 0,01	9,69 ± 0,42
	SSU-nk	0,60 ± 0,01	8,55 ± 0,10		SSU-nk	0,45 ± 0,01	10,14 ± 0,13
PLY-BB	SPU-nk	0,65 ± 0,01	9,24 ± 0,31	PLY-RP	SPU-nk	0,72 ± 0,01	7,60 ± 0,21
	SSU-nk	0,65 ± 0,01	9,64 ± 0,34		SSU-nk	0,72 ± 0,01	8,19 ± 0,13
PLY-ID	SPU-nk	0,57 ± 0,02	9,59 ± 0,36	SWP-3F	SPU-nk	0,49 ± 0,01	10,37 ± 0,32
	SSU-nk	0,57 ± 0,02	9,59 ± 0,36		SSU-nk	0,49 ± 0,02	10,67 ± 0,20
PLY-KQ	SPU-nk	0,52 ± 0,01	9,06 ± 0,86				
	SSU-nk	0,52 ± 0,01	10,38 ± 0,68				

* Statisch/Dynamisch - Scheibe/Platte - Ungekerbt/Kerb – normklimatisiert

** Mittelwert ± einfache Standardabweichung

Tabelle 4.2: Übersicht über Dichte und Feuchte der Proben der Schlagbiegeversuche

Klimatisierung bei $\vartheta_U = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und $\varphi_U = (65 \pm 5) \%$ relative Luftfeuchte Auftreffgeschwindigkeit $v_0 = 5,49$ m/s Aspektverhältnisse: $\lambda_p = 15$, $\lambda_w = 12$							
Werkstoff	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm ³	Feuchtegehalt** in %	Werkstoff	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm ³	Feuchtegehalt** in %
OSB-03	DPU-nk	0,62 ± 0,02	9,45 ± 0,27	PLY-PO	DPU-nk	0,47 ± 0,02	10,12 ± 0,20
	DSU-nk	0,60 ± 0,02	9,80 ± 0,22		DSU-nk	0,47 ± 0,02	10,42 ± 0,35
PLY-BB	DPU-nk	0,65 ± 0,01	10,28 ± 0,14	PLY-RP	DPU-nk	0,70 ± 0,01	9,15 ± 0,20
	DSU-nk	0,66 ± 0,01	9,61 ± 0,85		DSU-nk	0,71 ± 0,01	9,40 ± 0,14
PLY-ID	DPU-nk	0,57 ± 0,01	10,74 ± 0,21	SWP-3F	DPU-nk	0,50 ± 0,02	10,80 ± 0,22
	DSU-nk	0,58 ± 0,01	9,99 ± 0,20		DSU-nk	0,47 ± 0,03	9,65 ± 0,37
PLY-KQ	DPU-nk	0,52 ± 0,02	10,58 ± 0,27				
	DSU-nk	0,53 ± 0,02	10,55 ± 0,11				

* Statisch/Dynamisch - Scheibe/Platte - Ungekerbt/Kerb – normklimatisiert

** Mittelwert ± einfache Standardabweichung

Bei einzelnen Versuchen, statisch wie schlagartig, zeigten sich von den dargestellten Bruchbildern deutlich abweichende Charakteristiken. So wurden vereinzelt Delamination einer ganzen Schicht oder Versagen infolge von Rollschub einer Querlage über die gesamte Probenlänge beobachtet. Dies führte bei der Bestimmung der Bruchlänge, die sich in jedem Fall bestimmen lies, zu teils erheblichen Streuungen. Einzelne abweichende Versagensarten konnten nicht im Detail dokumentiert werden, da dies Aufwand und Umfang der Dokumentation in einem Maß vergrößert hätte, das im Verhältnis zur Auftretenshäufigkeit nicht gerechtfertigt erscheint.

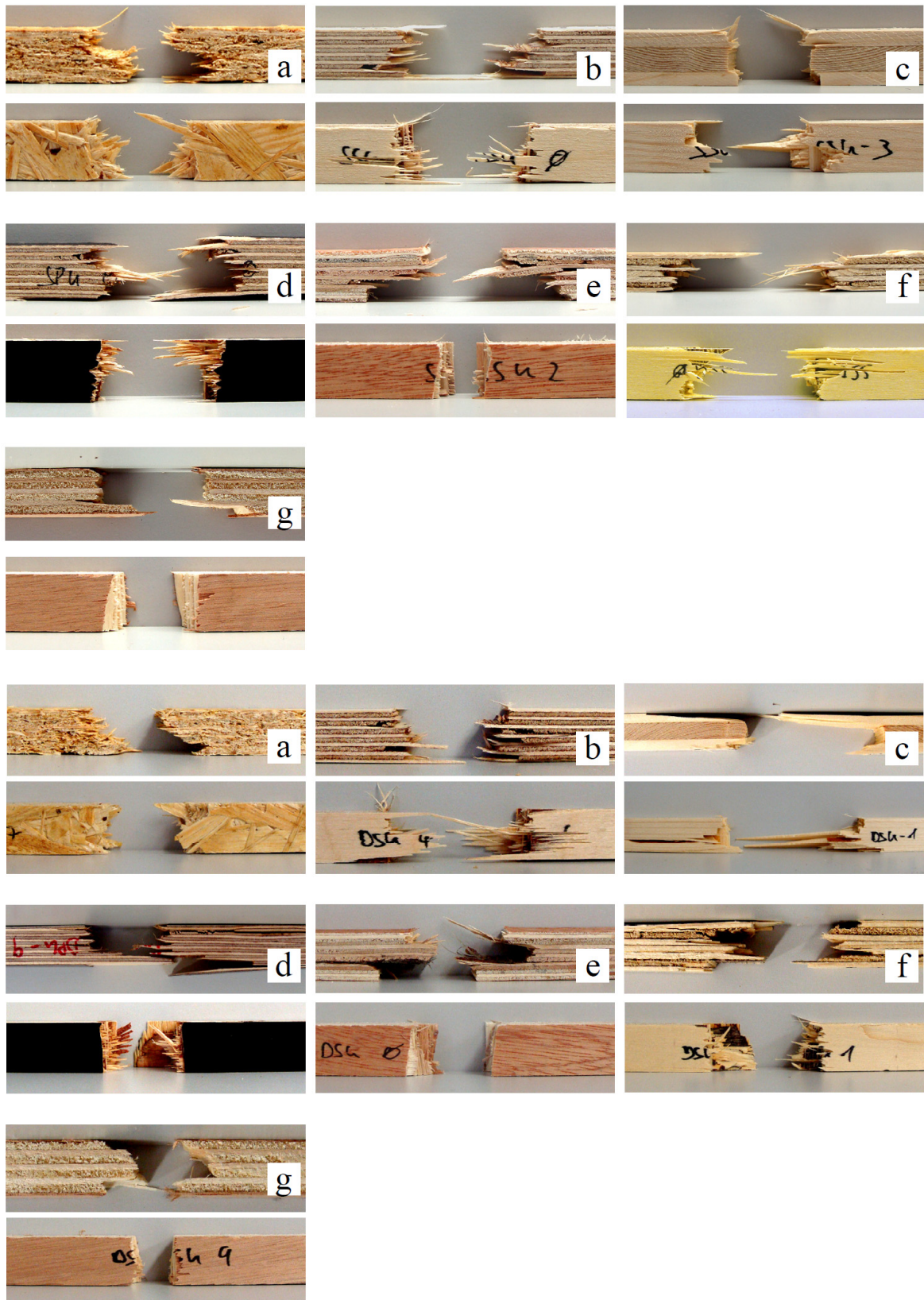


Abbildung 4.1: Obere Bilderserie: Bruchbilder der Querschnittsmessreihe der statischen Biegeversuche, Untere Bilderserie: Bruchbilder der Querschnittsmessreihe im Schlagversuch. Belastungsrichtung jeweils oberes Bild je Werkstoff Plattenbelastung unteres Bild je Werkstoff Scheibenbelastung. a) OSB-03, b) PLY-BB, c) SWP-3F, d) PLY-RP, e) PLY-ID, f) PLY-KQ, g) PLY-PO

4.2.2 Längsschnittmessreihe

Es wurden insgesamt 240 Schlagversuche an 3 verschiedenen Werkstoffen (1x OSB, 1x SWP und 1x PLY) und in 4 verschiedenen Konditionierungen (1 x Kerben und 3 x Klima) durchgeführt (vgl. Tabelle 3.8, S. 102). Jeweils 10 Proben wurden bei Scheiben- und Plattenbelastung geprüft. Die Proben zur Prüfung der thermischen Schädigung (nachfolgend als Klimazustand **r1** und **r2** bezeichnet) nach Kapitel 3.1.2, S. 67 wurden entsprechend Abbildung 3.5, S. 68 warmgelagert und im Anschluss daran wieder im Normklima reklimatisiert. Erst dann erfolgte die Prüfung. Entsprechend Kapitel 3.1.1, S. 63 ist weiterhin die Einstellung eines milden Klimas (trocken / kalt) zur Probenklimatisierung vorgesehen (nachfolgend als Klimazustand **r3** bezeichnet). Bei der Umsetzung zeigte sich jedoch das Problem, dass die vorhandene Klimakammer in diesen Bereich nicht regeln kann. Die vorgesehenen Einstellwerte des Umgebungsklimas von 17 °C und 15 % relative Luftfeuchtigkeit sind entsprechend des Regeldiagrammes (vgl. Abbildung 4.2) nicht darstellbar. Besonders die niedrige Luftfeuchtigkeit stellt ein regeltechnisches Problem bei Klimaschränken dar. Entsprechend bedurfte es einer abweichenden Vorgehensweise. Da eingeschätzt werden kann, dass vorrangig die geringe Ausgleichsfeuchte, weniger aber die moderat niedrigere Temperatur einen Einfluss auf das Schlagbruchverhalten ausübt, wurde folgendermaßen vorgegangen. Die Proben für diesen Klimatisierungszustand der Längsschnittmessreihe (mit **r3** gekennzeichnet) wurden im Trockenofen bis zur Darre getrocknet und anschließend sofort, ohne Reklimatisierung auf Normklima, geprüft. So gelang es zumindest die Veränderung des Bruchverhaltens bei trockenen Proben zu ermitteln. Die Proben in die ein Sägekerb nach Kapitel 3.2.3, S. 74 eingebracht ist, werden im Normklima konditioniert. Tabelle 4.3 gibt die Ausgleichsfeuchten und Dichten der Prüflose an.

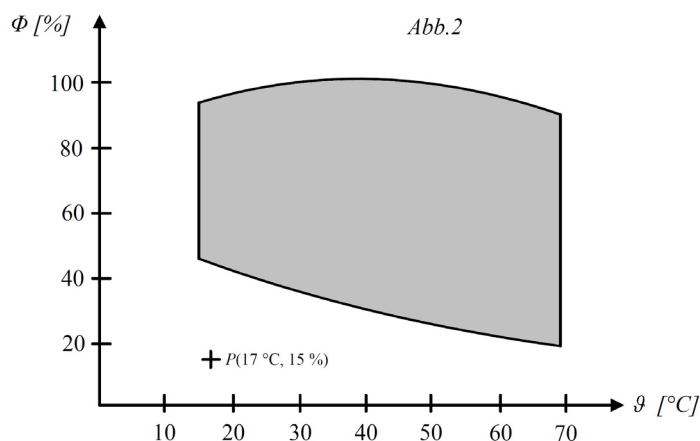


Abbildung 4.2: Regelfeld des zur Probenkonditionierung genutzten Klimaschranks Mytron KPW-1 (entsprechend Datenblatt)

Tabelle 4.3: Übersicht über Dichte und Feuchte in den Proben der Schlagversuche

(Re-) Klimatisierung bei $\vartheta_U = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $\varphi_U = (65 \pm 5)\%$ relative Luftfeuchte Auftreffgeschwindigkeit $v_0 = 5,49\text{ m/s}$ Aspektverhältnisse: $\lambda_p = 15$, $\lambda_w = 12$						
Werkstoff	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm^3	Feuchtegehalt** in %	Kurzzeichen*	Dichte** in g/cm^3	Feuchtegehalt** in %
OSB-03	DPK-nk	$0,63 \pm 0,030$	$8,99 \pm 0,24$	DPU-r1	$0,60 \pm 0,017$	$8,87 \pm 0,22$
	DSK-nk	$0,63 \pm 0,012$	$9,27 \pm 0,21$	DSU-r1	$0,59 \pm 0,022$	$8,64 \pm 0,35$
PLY-BB	DPK-nk	$0,65 \pm 0,007$	$10,01 \pm 0,26$	DPU-r1	$0,65 \pm 0,006$	$8,54 \pm 0,94$
	DSK-nk	$0,66 \pm 0,009$	$9,86 \pm 0,25$	DSU-r1	$0,64 \pm 0,007$	$9,26 \pm 0,52$
SWP-3F	DPK-nk	$0,44 \pm 0,017$	$10,50 \pm 0,11$	DPU-r1	$0,46 \pm 0,020$	$9,10 \pm 0,21$
	DSK-nk	$0,48 \pm 0,031$	$10,56 \pm 0,65$	DSU-r1	$0,46 \pm 0,024$	$9,22 \pm 0,25$
OSB-03	DPU-r2	$0,61 \pm 0,027$	$7,64 \pm 0,29$	DPU-r3***	$0,57 \pm 0,018$	-
	DSU-r2	$0,61 \pm 0,028$	$8,40 \pm 0,66$	DSU-r3	$0,58 \pm 0,014$	-
PLY-BB	DPU-r2	$0,64 \pm 0,008$	$7,78 \pm 0,61$	DPU-r3	$0,61 \pm 0,032$	-
	DSU-r2	$0,65 \pm 0,007$	$8,23 \pm 0,16$	DSU-r3	$0,59 \pm 0,005$	-
SWP-3F	DPU-r2	$0,44 \pm 0,022$	$8,85 \pm 0,28$	DPU-r3	$0,40 \pm 0,019$	-
	DSU-r2	$0,44 \pm 0,030$	$8,65 \pm 0,96$	DSU-r3	$0,40 \pm 0,019$	-

* Statisch/Dynamisch - Scheibe/Platte - Ungekerbt/Kerb – normklima/Klimazustand r1 - r3
** Mittelwert \pm einfache Standardabweichung
*** Dichte im darrtrockenen Zustand angeben

Die thermisch belasteten Proben zeigten jeweils mit zunehmender Temperaturstufe eine dunklere Verfärbung (vgl. Abbildung 4.3). Eine Veränderung der charakteristischen Bruchbilder im Vergleich zu den im Normklima geprüften Proben konnte nicht festgestellt werden. Einzig bei SWP-3F zeigte sich bei den Temperaturstufen 105°C und 200°C ein Schubversagen der Klebefugen (vgl. Abbildung 4.3f und i). Dieser Schadensmechanismus trat bei einem Großteil der Proben auf und ist auf die thermische Zersetzung des Klebstoffes (Harnstoff- / Melaminharz vgl. Tabelle 3.3, S. 72) zurückzuführen. Ein Einfluss der eingebrachten Sägekerben auf das Bruchbild konnte nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 4.3 a bis c). Auf die Darstellung der Bruchbilder der ohne Reklimateisierung geprüften Proben wurde verzichtet, da deren Bruchbilder denen des Klimazustands r1 gleichen (vgl. Abbildung 4.3 d bis f).

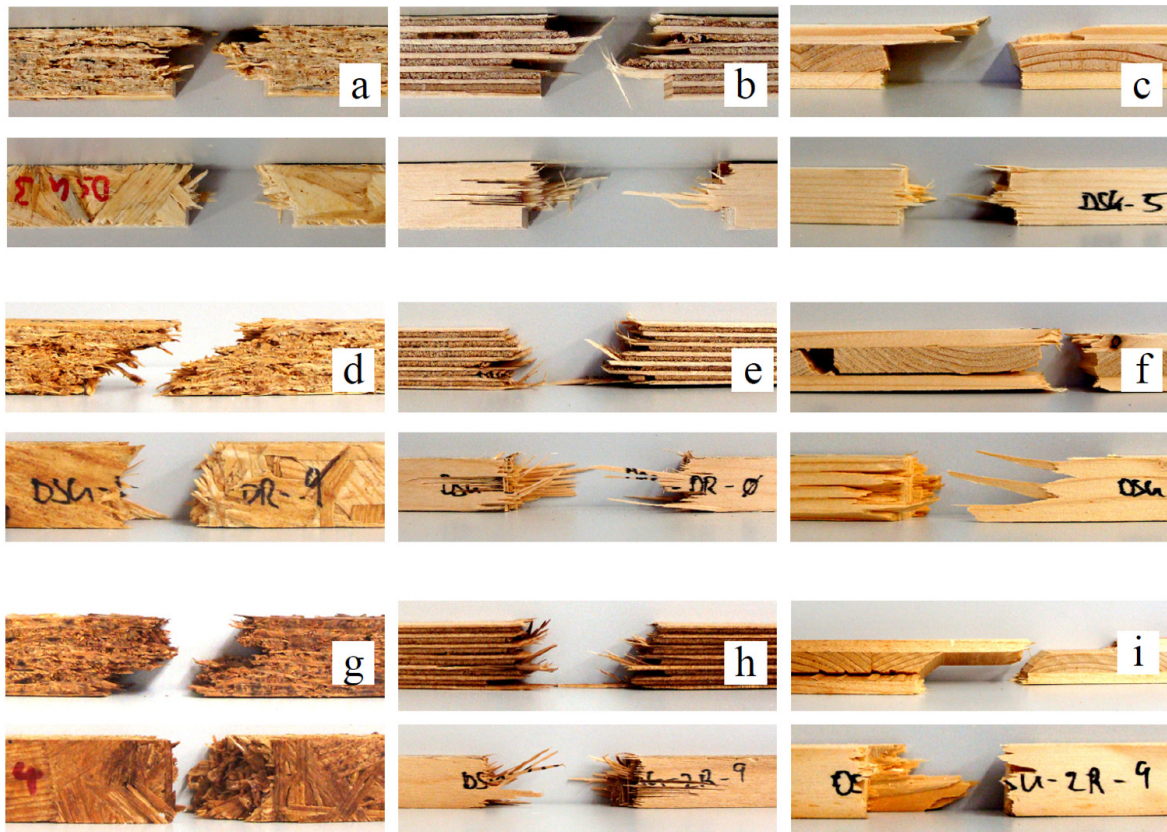


Abbildung 4.3: Bruchbilder der Längsschnittmessreihe, a, d, g OSB-03 gekerbt; b, e, h PLY-BB Klimazustand r1; c, f, i SWP-3F Klimazustand r2. Belastungsrichtung jeweils oberes Bild je Werkstoff Plattenbelastung unteres Bild je Werkstoff Scheibenbelastung.

4.3 Algorithmen zur Ermittlung der Kennwerte

4.3.1 Kennwerte des statischen Biegeversuchs

Die aufgezeichneten Zeitreihen der Kraft- $F_{sta}(t)$ und Durchbiegungsverläufe $u_s(t)$ werden zunächst mit der Maschinenkennlinie korrigiert. Zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens, auch im Hinblick auf den Vergleich mit den Schlagversuchen, werden Kennwerte definiert. Diese umfassen neben diskreten Kraft- und Verformungskennwerten auch kumulierte energetische Größen. Für letztgenannte erfolgt entsprechend Kapitel 3.5, S. 78 die Unterteilung der F-u-Kurven beim Biegeversuch in die drei Bereiche i) elastische Verformung bis zur Proportionalitätsgrenze, ii) nichtlineares Ansteigen der Kraft bis zur Maximalkraft und iii) Restbruch (vgl. Abbildung 3.11, S. 78 und Abbildung 3.12, S. 79). In Abbildung 4.5 sind die zur Analyse herangezogenen, ermittelten Kennwerte beispielhaft dargestellt. Zunächst ist die Proportionalitätsgrenze $P(F_{p,s}, u_{p,s})$ zu bestimmen. Es ist an dieser Stelle allerdings noch unklar, ob das beschriebene Modell (einer linear-elastischen, nichtlinear-plastischen Verformung) tatsächlich auf die vorliegenden Versuche bzw. Werkstoffe übertragbar ist. So wird die Prüfung auf Vorhanden-

sein einer Proportionalitätsgrenze wie folgt durchgeführt. Zwischen jedem Punkt der Kurve $P(F_{sta}(t_i), u_s(t_i))$ und dem Koordinatenursprung $P(0,0)$ wird ein lineares Modell $f=f(u_s)$ gebildet. Dies wird bis zur Maximalkraft $P(F_{max,s}, u_{max,s})$ durchgeführt. Für jedes Modell werden die Beträge der Residuen⁴⁸ aufsummiert (vgl. Gleichung 4.1).

$$RS(u_s(t_i)) = \frac{\sum_{i=1}^{i_{ges}} |F_{sta}(t_i) - f(u_s(t_i))|}{t_i} ; i=2,3 \dots i_{ges} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

Die Residuensummen $RS(u_s(t_i))$ sind auf die jeweilige Kurvenabschnittslänge t_i normiert. Ist nun eine Proportionalitätsgrenze $P(F_{p,s}, u_{p,s})$ vorhanden, führt dies zu einer Unstetigkeitsstelle im Differenzenquotient der normierten Residuensumme, die sich deutlich abzeichnet und identifizieren lässt. In Abbildung 4.4 ist der Differenzenquotient $\Delta RS / \Delta u$ der normierten Residuensummen für den Werkstoff PLY-BB bei Plattenbelastung abgebildet. Deutlich erkennbar ist die Unstetigkeitsstelle bei $\sim 1,4$ mm Durchbiegung. In gleicher Weise ist diese Unstetigkeitsstelle bei allen anderen Werkstoffen bei Scheiben- und Plattenbelastung identifizierbar. Somit konnte zweierlei für die Analyse erreicht werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die untersuchten Holzwerkstoffe bei statischer Dreipunktbiegung über einen ausgeprägten linearen Bereich mit einer Proportionalitätsgrenze verfügen. Weiterhin steht mit dieser oberen Grenze ein fester Punkt zur Bestimmung des Anstiegs des linearen Bereichs und somit des Biege-Elastizitätsmoduls bereit.

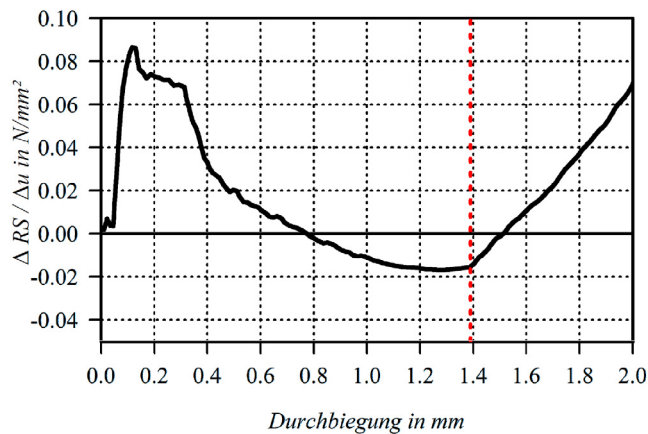


Abbildung 4.4: Differenzenquotient aus normierter Residuensumme und Durchbiegung über der Durchbiegung. Vertikal bei $\sim 1,4$ mm Durchbiegung Unstetigkeitsstelle der Proportionalitätsgrenze. Daten beispielhaft für PLY-BB statische Belastung in Plattenrichtung

⁴⁸ Residuen bezeichnen die diskreten Differenzen zwischen Modell und Messung.

Tabelle 4.4: Übersicht über Kennwerte der statischen Versuche, aus den F-u-Kurven ermittelt

Kurzz.*	Einheit	Beschreibung
$F_{p,s}$	kN	Kraft an der Proportionalitätsgrenze
$u_{p,s}$	mm	Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze
$F_{max,s}$	kN	Maximalkraft bei statischer Messung
$u_{max,s}$	mm	Durchbiegung bei Maximalkraft bei statischer Messung
$E_{norm,s}$	N/mm ²	Modul zwischen 10 % & 40 % von $F_{max,s}$ bestimmt nach [DIN EN 310]
$E_{p,s}$	N/mm ²	Modul mit Koordinatenursprung und Proportionalitätsgrenze bestimmt
$W_{lib,s}$	J	Arbeit im linearen Bereich
$W_{nlb,s}$	J	Arbeit im nichtlinearen Bereich
$W_{rbb,s}$	J	Restbrucharbeit

* Die Kennwerte sind mit Index _s für statischen Versuch und Index _d für dynamischen Schlagversuch versehen.

Als weitere Kennwerte für die spätere deskriptiv-statistische Auswertung der Kennwerte und zum Vergleich mit Schlagversuch wird das Kraftmaximum $P(F_{max,s}, u_{max,s})$ und der Modul $E_{norm,s}$ zwischen den Punkten der F - u -Kurve bei 10 % und 40 % von $F_{max,s}$ bestimmt. Ebenso wird die Arbeit im linearen Bereich $W_{lib,s}$, die Arbeit im nichtlinearen Bereich $W_{nlb,s}$ und die Restbrucharbeit $W_{rbb,s}$ berechnet (vgl. Abbildung 4.5). Tabelle 4.4 gibt nochmals einen Überblick über die aus dem F - u -Kurvenverlauf bestimmten Kennwerte.

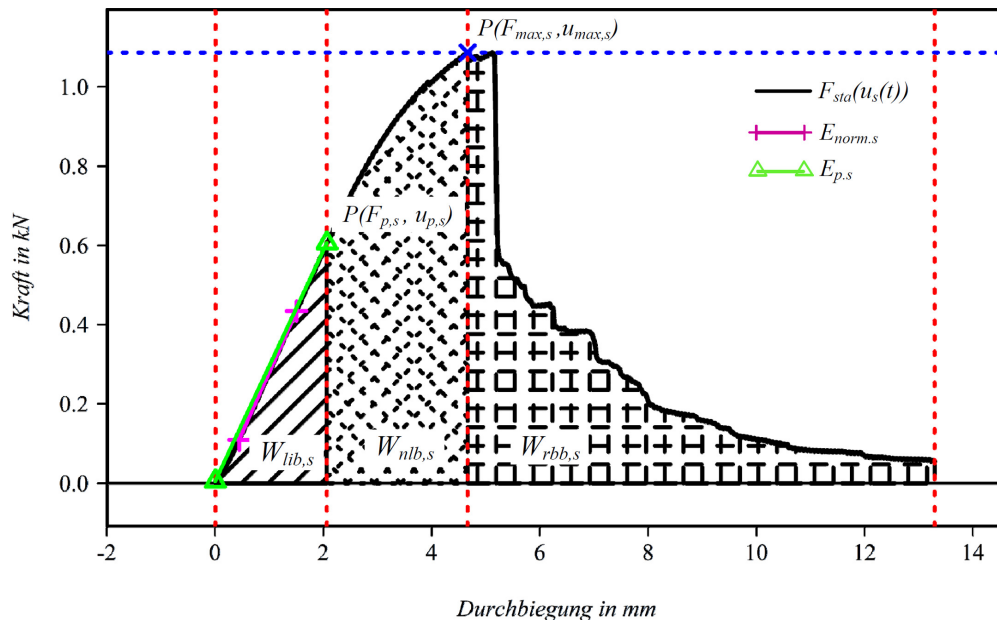


Abbildung 4.5: Kennwerte ermittelt aus den statischen Biegeversuchen, beispielhaft für den Werkstoff PLY-BB bei Scheibenbelastung dargestellt.

Da die ausgewählten Plattenwerkstoffe verschiedene Dicken aufweisen, der Schlankheitsgrad λ_w aber konstant gehalten werden soll und sich somit die Stützweite ändert, wird es erforderlich die auftretenden Kräfte und Verformungen auf die Geometrie der Proben zu bezie-

hen. Ein Vergleich der Werkstoffe untereinander ist sonst nicht möglich. Dafür bietet sich die Umrechnung in Biegespannung und Randfaserdehnung an. Unter der Voraussetzung, dass i) Biegeradius $r \gg$ Probenhöhe h_p , ii) Durchbiegung $u \ll$ Stützweite l_w und iii) einfache Hauptachsenbiegung vorliegt, gilt für die Umrechnung der Durchbiegung u_s in die Randfaserdehnung $\varepsilon_{\max}(u_s)$ sowie die Umrechnung der Kraft F_{sta} in die Biegespannung in der Randfaser $\sigma_{\max}(F_{sta})$ Gleichung 4.2.

$$\varepsilon_{\max}(u_s) = \frac{6 \cdot u_s \cdot h_p}{l_w^2}; \quad \sigma_{\max}(F_{sta}) = \frac{F_{sta} \cdot l_w \cdot h_p}{8 \cdot I_{yy}}; \quad l_w = 12 \cdot h_p \quad \text{Gleichung 4.2}$$

Die Anwendung der vorgenannten Modellvorstellung auf die Beanspruchung beim statischen Biegeversuch ist unproblematisch. Wohingegen diese beim Schlagbiegeversuch kritisch zu sehen ist. Es würde auf diese Weise vermittelt, dass bei schlagartiger Belastung ein definiertes, zeitinvariantes Beanspruchungsfeld, mit lokalem Maximum vorherrscht. Davon kann aber in keiner Weise ausgegangen werden. Um den Vergleich zwischen den verschiedenen Probenabmessungen einerseits und den bezogenen Größen zwischen statischen Biegeversuch und Schlagbiegeversuch andererseits, anstellen zu können, sind andere, vom Spannungs-Dehnungs-Modell abweichende bezogene Größen notwendig. Da beim gewählten Versuchsssetup der Schlankheitsgrad der Probe, bezogen auf den Widerlagerabstand, stets gleich ist und auch der Probenquerschnitt stets quadratisch gehalten wurde, ergibt sich die Möglichkeit, bezogene Größen nach Gleichung 4.3 (vgl. Gleichung 4.5 bis Gleichung 4.7) anzuwenden. Diese stehen in einer festen Relation ($\frac{1}{2}$ und 18) zur Randfaserdehnung bzw. -spannung (vgl. Gleichung 4.4). Es tritt somit kein Informationsverlust auf. Die für den Schlagbiegeversuch irreführende Angabe von Spannungen und Dehnungen wird aber gleichzeitig vermieden.

$$v_s(u_s) = \frac{u_s}{l_w}; \quad f_s(F_{sta}) = \frac{F_{sta}}{h_p^2} = \frac{F_{sta}}{A_q}; \quad l_w = 12 \cdot h_p \quad \text{Gleichung 4.3}$$

$$\varepsilon_{\max}(u_s) = \frac{u_s}{2 \cdot l_w}; \quad \sigma_{\max}(F_{sta}) = \frac{18 \cdot F_{sta}}{h_p^2}; \quad l_w = 12 \cdot h_p \quad \text{Gleichung 4.4}$$

Um auch für die Arbeitsaufnahme Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen dicken Werkstoffen herzustellen, werden diese auf die Querschnittfläche der Biegeprobe bezogen (vgl. Abbildung 4.5 und Tabelle 4.5). Dieses Vorgehen ermöglicht im Weiteren den Vergleich der Arbeitsaufnahme im statischen Versuch mit der im Schlagbiegeversuch bestimmten.

$$v_{p,s} = u_{p,s} / l_w; \quad v_{\max,s} = u_{\max,s} / l_w; \quad \kappa_{B,s} = l_b / l_w \quad \text{Gleichung 4.5}$$

$$f_{p,s} = F_{p,s} / A_q; \quad f_{\max,s} = F_{\max,s} / A_q \quad \text{Gleichung 4.6}$$

$$w_{lib,s} = W_{lib,s} / A_q ; w_{nlb,s} = W_{nlb,s} / A_q ; w_{rbb,s} = W_{rbb,s} / A_q \quad \text{Gleichung 4.7}$$

Tabelle 4.5: Übersicht über die bezogenen Größen der statischen Versuche

Kurzz.*	Einheit	Beschreibung
$v_{p,s}$	mm/mm	Druchbiegung an der Proportionalitätsgrenze, bezogen auf den Widerlagerabstand
$v_{max,s}$	mm/mm	Durchbiegung bei Maximalkraft, bezogen auf den Widerlagerabstand
$f_{p,s}$	N/mm ²	Kraft an der Proportionalitätsgrenze, bezogen auf die Querschnittsfläche
$f_{max,s}$	N/mm ²	Maximalkraft, bezogen auf die Querschnittsfläche
$w_{lib,s}$	kJ/m ²	Arbeit im linearen Bereich, bezogen auf die Querschnittsfläche
$w_{nlb,s}$	kJ/m ²	Arbeit im nichtlinearen Bereich, bezogen auf die Querschnittsfläche
$w_{rbb,s}$	kJ/m ²	Restbrucharbeit, bezogen auf die Querschnittsfläche
$K_{B,s}$	mm/mm	Bruchlänge, bezogen auf den Widerlagerabstand

* Die Kennwerte sind mit Index _s für statischen Versuch und Index _d für dynamischen Schlagversuch versehen.

4.3.2 Kennwerte des Schlagversuchs

Wie in Kapitel 3.6.5, S. 91 ff. deutlich wird, sind die gemessenen Signale mit Eigenschwingungen des Messsystems überlagert. Diese können im ungünstigen Fall die nicht-kumulativen Kennwerte, ermittelt aus dem Kraft-Weg-Verlauf, verfälschen. Um dem vorzubeugen, wird das Kraftsignal $F_{dyn}(t)$ vor der Ermittlung der Kennwerte gefiltert. Die in der Modalanalyse ermittelten Frequenzanteile der Eigenschwingungen werden mittels Filter (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) aus dem Messsignal weitgehend eliminiert (vgl. Abbildung 4.6). Es ergibt sich das gefilterte Kraftsignal $F_{flt}(t)$ (vgl. Abbildung 4.8) mit dem alle weiteren Berechnungen durchgeführt werden. Der Weg-Zeit-Verlauf $u_{d,a}(t)$ während des Bruches wurde zunächst durch doppelte numerische Integration des am Sensor gemessenen Beschleunigungs-Zeit-Verlaufs $a_s(t)$ mit den Konstanten $u_0 = 0$ und $v_0 = 5,49 \text{ m/s}^2$ (vgl. Kapitel 3.6.5, S. 91) ermittelt (vgl. Gleichung 4.8).

$$v_{d,a}(t) = \sum_{i=1}^{i_{ges}} a_s(t_i) \cdot \Delta t_i + v_0 ; u_{d,a}(t) = \sum_{i=1}^{i_{ges}} v_{d,a}(t_i) \cdot \Delta t_i + u_0 ; \quad \text{Gleichung 4.8}$$

$$\Delta t_i = t_i - t_{(i-1)} ; i = 1, 2 \dots i_{ges}$$

Bei der Analyse⁴⁹ der Beschleunigungssignale zeigte sich, dass diese niederfrequente Schwingungen des Pendelschlagwerks aufzeichnen, die zu einer Verfälschung des kumulierten Weg-Zeit-Verlaufs führen. Der redundante Aufbau der Sensorik (vgl. Kapitel 3.6.2, S. 82) ermöglicht es nun aber wiederum aus dem gemessenen Kraft-Zeit-Verlauf den Weg-Zeit-Verlauf des Pendelhammers zu berechnen.

⁴⁹ Die Kenntnis über diesen Effekt trat erst bei der Analyse der verschiedenen Werkstoffe im Querschnittversuch auf. Bei dem im Vorfeld durchgeführten Probemessungen an OSB-03 trat dieser Effekt nicht auf.

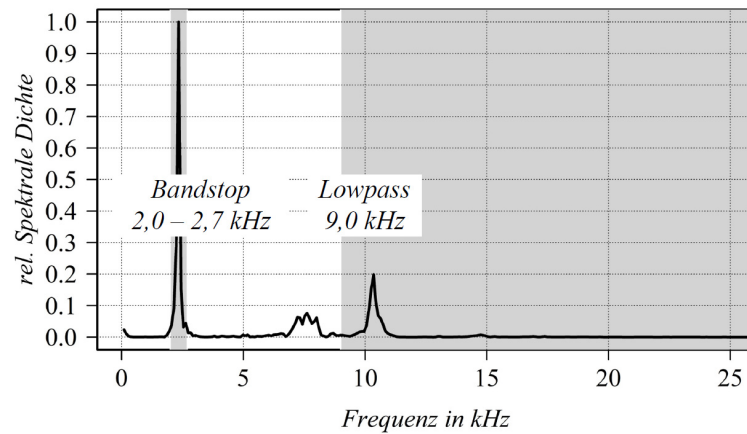


Abbildung 4.6: Bandstop- und Lowpassfilter (weiß Passband, grau Stopband) im Frequenzgang des Kraftsignals

Die auf das Pendel einwirkende diskrete Kraftänderung $F_{dyn}(t_i)$ bzw. $F_{fl}(t_i)$ im Abstand r_m zum Drehpunkt des Pendels führt zu einer Drehimpulsänderung ΔL_i (vgl. Gleichung 4.9 und Gleichung 4.10). Da der Anfangsdrehimpuls $L_{P,0}$ im Auftreffpunkt und das Trägheitsmoment J_P des Pendels bekannt ist (vgl. Kapitel 3.6.3, S. 85), kann die Geschwindigkeit des Pendels zu jedem Zeitpunkt t_i und daraus der zurückgelegte Weg bestimmt werden (vgl. Gleichung 4.11). Für alle weiteren Berechnungen und Darstellungen wird so stets der Wegverlauf $u_d(t)$, berechnet mittels Impulserhaltung, genutzt.

$$L_{P,0} = J_P \cdot \omega ; L_P(t_i) = L_{P,0} - \Delta L_i ; \Delta L_i = F_{fl}(t_i) \cdot r_m \cdot \Delta t_i \quad \text{Gleichung 4.9}$$

$$L_P(t) = L_{P,0} - \sum_{i=1}^{i_{ges}} F_{fl}(t_i) \cdot r_m \cdot \Delta t_i \quad \text{Gleichung 4.10}$$

$$v_d(t) = \omega(t) \cdot r_m = \frac{L_P(t)}{J_P} ; u_d(t) = \sum_{i=1}^{i_{ges}} v_d(t_i) \cdot \Delta t_i \quad \text{Gleichung 4.11}$$

Gleichzeitig bietet sich die Möglichkeit die Änderung der Rotationsenergie des Pendels ΔE_{rot} vor (ω_0) und nach (ω_1) dem Schlag zu bestimmen. Diese kann mit der Brucharbeit $W_{B,a}$, bestimmt aus dem Wegverlauf (doppelte numerische Integration des Beschleunigungssignales) und dem Kraftverlauf, verglichen werden (vgl. Gleichung 4.12 und Fehler: Referenz nicht gefunden). Es ist zu erwarten, dass die gesamte während des Schlags aufgenommene Arbeit $W_{B,d}$ größer als die beim Bruch verbrauchte Brucharbeit $W_{B,a}$ ist, da im Pendel selbst während des Bruches Arbeit in Form von elastischen Verformungen verrichtet wird (vgl. Abbildung 4.7).

$$\Delta E_{rot} = W_B, d = \frac{1}{2} J_P (\omega_0 - \omega_1)^2 \quad \text{Gleichung 4.12}$$

$$W_{B,d} = \sum_{i=1}^m F_{fl}(t_i) \cdot \Delta u_d(t_i) ; W_{B,a} = \sum_{i=1}^m F_{fl}(t_i) \cdot \Delta u_{d,a}(t_i) \quad \text{Gleichung 4.13}$$

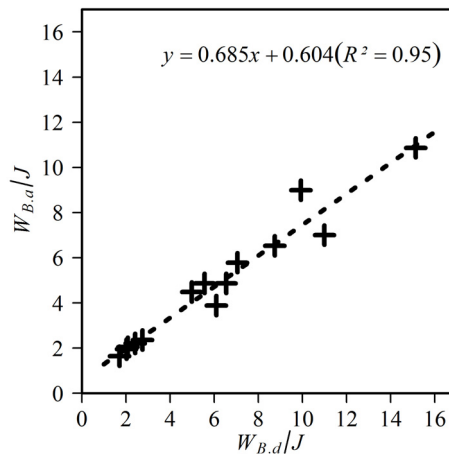


Abbildung 4.7: Korrelation zwischen Brucharbeit und verbrauchter Rotationsenergie

Aus dem Kurvenverlauf des Schlagversuches (vgl. Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.10) werden Kennwerte ermittelt, die zur Charakterisierung der Werkstoffe dienen. Die Unterteilung der zeitlichen Abfolge des Bruchs wird entsprechend Kapitel 3.6.4, S. 89 vorgenommen (vgl. auch Abbildung 2.16, S. 45). Die Bereichsgrenzen des Trägheitsmaximums (inertial peak, Index $_{ip}$), des zweiten Kraftanstieges (prior to rupture Index $_{pr}$) und des Restbruches (Index $_{rb}$) werden im Analyseprogramm identifiziert. Die Arbeitsaufnahme in diesen Bereichen wird bestimmt. Die Summe der Arbeitsaufnahme in den einzelnen Bereichen entspricht wiederum der Änderung der Rotationsenergie des Pendels (vgl. Gleichung 4.14). Ebenso werden die charakteristischen Punkte des Kurvenverlaufes (vgl. Abbildung 4.8) im Analyseprogramm bestimmt. Diese sind das Trägheitsmaximum $P(F_{ip,d}, u_{ip,d})$ und das Kraftmaximum bzw. die Bruchkraft $P(F_{max,d}, u_{max,d})$. Die aus den F-u-Verläufen ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. In die Auswertung fließen auch die Probenabmessungen und Probengewichte entsprechend Tabelle 3.5, S. 74 und Tabelle 3.6, S. 77 ein.

$$\Delta E_{rot} = W_{B,d} = W_{ip,d} + W_{pr,d} + W_{rb,d} \quad \text{Gleichung 4.14}$$

Um die Holzwerkstoffe verschiedener Dicke (und daraus resultierender verschiedener Probenabmessungen) vergleichen zu können, ist es erforderlich bezogene Größen zu definieren. Dies erfolgt in Analogie zu den statischen Versuchen (vgl. Tabelle 4.5, S. 120). Die in den verschiedenen Bereichen ermittelten Arbeiten sowie die Kraftkennwerte werden auf den jeweiligen individuellen Probenquerschnitt bezogen⁵⁰. Die Verformungskennwerte und die Bruchlänge nach dem Schlagversuch werden auf den Widerlagerabstand bezogen (vgl. Tabelle 4.7 und Gleichung 4.15 bis Gleichung 4.17).

⁵⁰ Bei gekerbten Proben ist die Bezugsgröße nicht die Querschnittfläche A_q sondern die Restquerschnittfläche $A_{q,r}$ (vgl. Kapitel 3.2.2, S. 73)

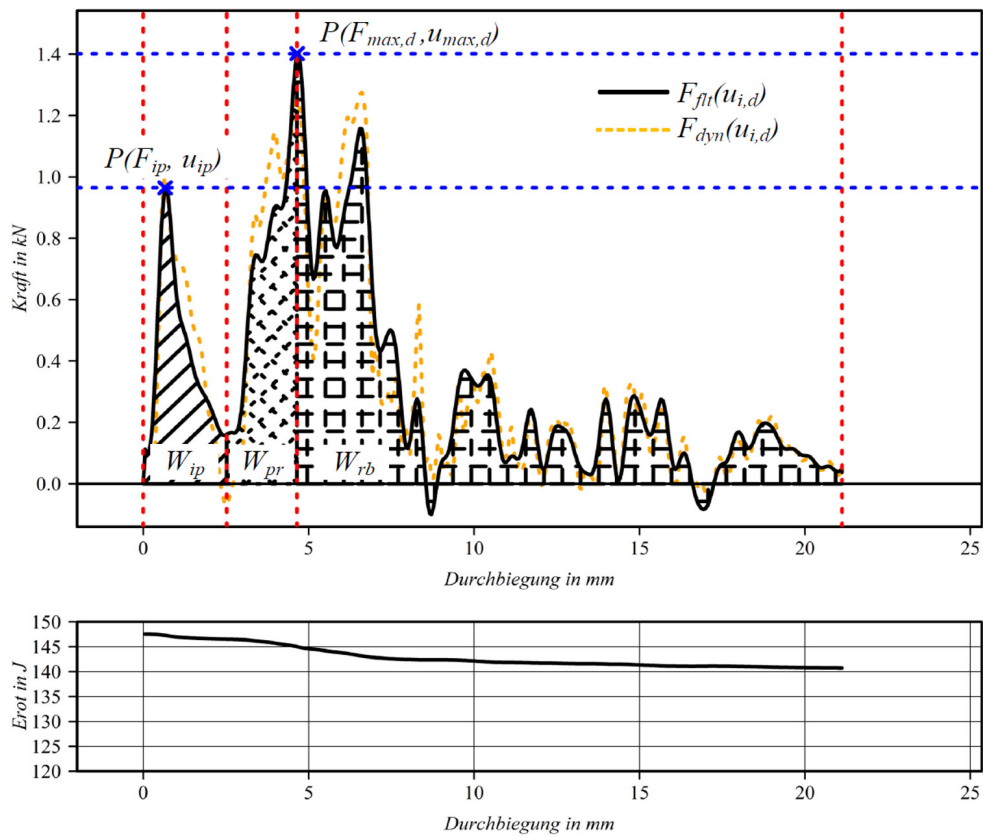


Abbildung 4.8: Kennwerte ermittelt aus den Kraft-Weg-Kurven der Schlagversuche.

Tabelle 4.6: Übersicht über die aus den F-u-Kurven ermittelten Kennwerte, im Schlagversuch

Kurzz.*	Einh.	Beschreibung
$u_{ip,d}$	mm	Durchbiegung am Trägheitsmaximum (inertial peak)
$u_{max,d}$	mm	Durchbiegung bei Kraftmaximum (Bruch)
$F_{ip,d}$	kN	Kraft am Trägheitsmaximum (inertial peak)
$F_{max,d}$	kN	Kraftmaximum (Bruch)
$W_{ip,d}$	J	Arbeit im Bereich des inertial peak
$W_{pr,d}$	J	Arbeit bis zum Erreichen von $F_{max,d}$ (prior to ruptur)
$W_{rb,d}$	J	Restbrucharbeit

* Die Kennwerte sind mit Index _s für statischen Versuch und Index _d für dynamischen Schlagversuch versehen.

$$v_{ip,d} = u_{ip,d} / l_w ; \quad v_{max,d} = u_{max,d} / l_w ; \quad \kappa_{b,d} = l_b / l_w \quad \text{Gleichung 4.15}$$

$$f_{ip,d} = F_{ip,d} / A_q ; \quad f_{max,d} = F_{max,d} / A_q \quad \text{Gleichung 4.16}$$

$$w_{ip,d} = W_{ip,d} / A_q ; \quad w_{pr,d} = W_{pr,d} / A_q ; \quad w_{rb,d} = W_{rb,d} / A_q \quad \text{Gleichung 4.17}$$

Tabelle 4.7: Übersicht über die bezogenen Größen des Schlagversuchs

Kurzz.*	Einh.	Beschreibung
$v_{ip,d}$	mm/mm	Druchbiegung am Trägheitsmaximum (inertial peak), bezogen auf den Widerlagerabstand
$v_{max,d}$	mm/mm	Durchbiegung Kraftmaximum (Bruch), bezogen auf den Widerlagerabstand
$f_{ip,d}$	N/mm ²	Kraft am Trägheitsmaximum (inertial peak), bezogen auf die Querschnittsfläche**
$f_{max,d}$	N/mm ²	Kraftmaximum (Bruch), bezogen auf die Querschnittsfläche**
$w_{ip,d}$	kJ/m ²	Arbeit im Bereich des inertial peak, bezogen auf die Querschnittsfläche**
$w_{pr,d}$	kJ/m ²	Arbeit bis zum Erreichen von $F_{max,d}$ (prior to ruptur), bezogen auf die Querschnittsfläche**
$w_{rb,d}$	kJ/m ²	Restbrucharbeit, bezogen auf die Querschnittsfläche**
$\kappa_{b,d}$	mm/mm	Bruchlänge, bezogen auf den Widerlagerabstand

* Die Kennwerte sind mit Index „s“ für statischen Versuch und Index „d“ für dynamischen Schlagversuch versehen.

** Bei gekerbten Proben ist die Bezugsgröße nicht die Querschnittsfläche A_q sondern die Restquerschnittsfläche $A_{q,r}$ (vgl. Kapitel 3.2.2, S. 73).

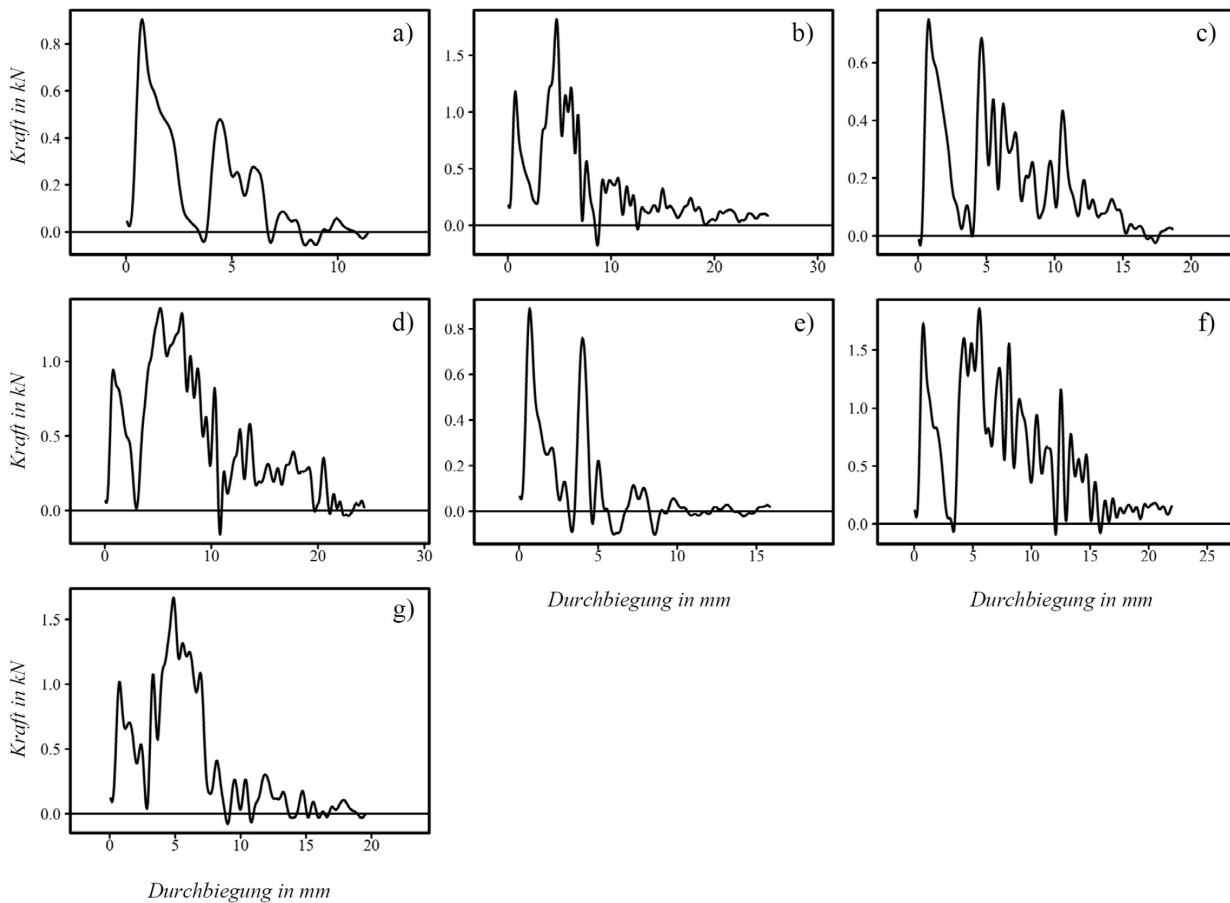


Abbildung 4.9: Beispiele des Kraft-Durchbiegungs-Verlaufs bei Plattenbelastung a) OSB-03, b) PLY-BB, c) PLY-ID, d) PLY-KQ, e) PLY-PO, f) PLY-RP, g) SWP-3F

In Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 sind abschließend gefilterte Kraft-Durchbiegungs-Verläufe für die verschiedenen Werkstoffe angegeben. In jedem Fall ist zunächst das Trägheitsmaximum mit dem anschließenden Abfall der Kraft zu erkennen. Die anschließende

Bruchcharakteristik zeigt sich stark verschieden. Teilweise wird die Höhe der Kraft beim Trägheitsmaximum nicht nochmals erreicht (vgl. Abbildung 4.9a, c und e sowie Abbildung 4.10a, c und e), teilweise aber auch deutlich überschritten. Auch das Verhalten nach Erreichen der Bruchkraft zeigt verschiedene Ausprägungen. Zum einen sind relativ zügig abfallende Kraftwerte vorhanden (Abbildung 4.9a, e und g sowie Abbildung 4.10a, c und e). Zum anderen sind auch ausgeprägtere Restbruchbereiche vorhanden. Die genannten Effekte sind bei Platten- und Scheibenbelastung in ähnlicher Weise anzutreffen. Dennoch sind starke werkstoffabhängige Unterschiede im charakteristischen Kurvenverlauf festzustellen. Die Kurvenverläufe bei Scheibenbelastung unterscheiden sich dahingehend von denen bei Plattenbelastung, dass ihnen eine deutlichere Schwingung überlagert ist. Der Grund hierfür kann in höheren Kräften bei Scheibenbelastung (vgl. Abbildung 4.17b, S. 132 und Abbildung 4.18b, S. 133) vermutet werden. Infolge deren Impulsanregung sind die Schwingungen von Prüfeinrichtung und Probe amplitudenmäßig stärker ausgeprägt.

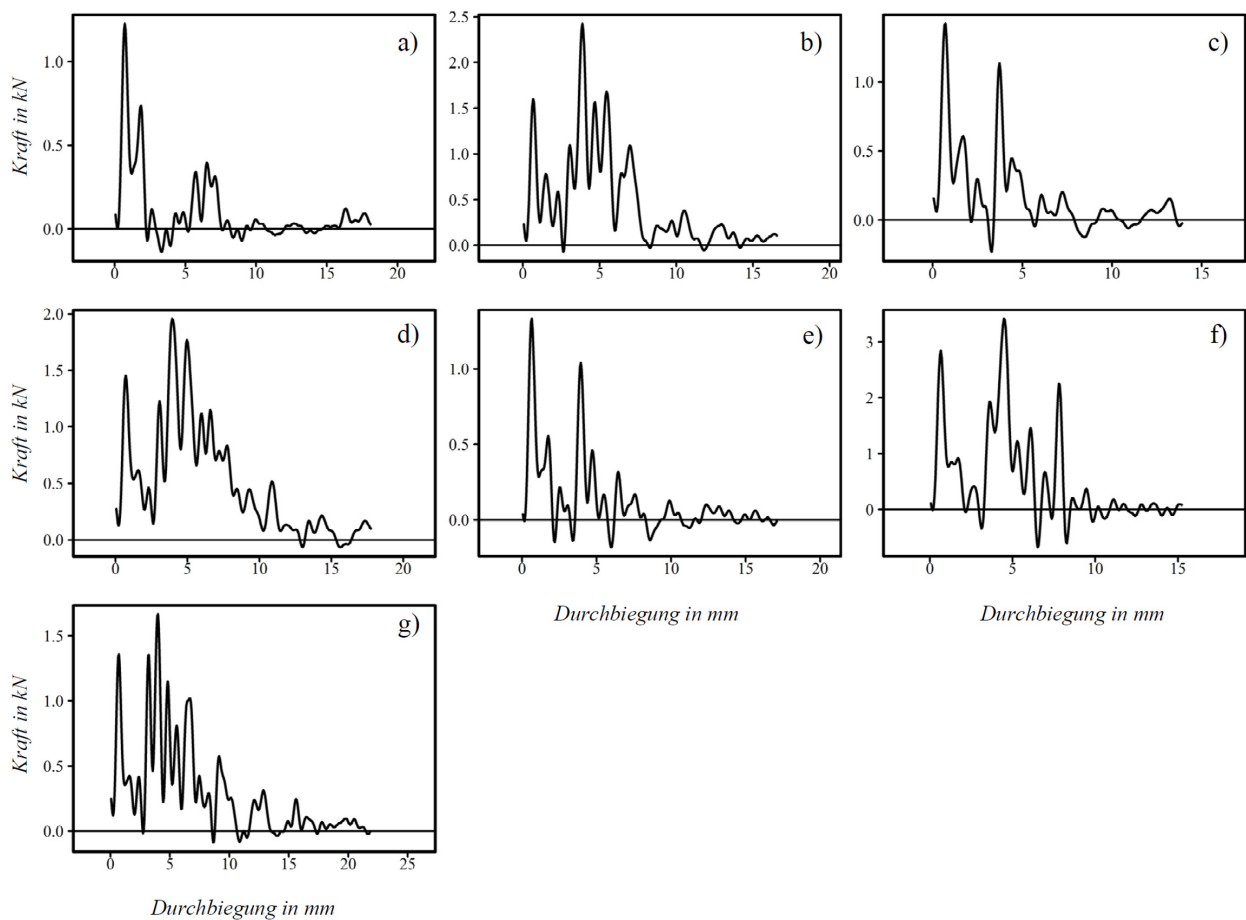


Abbildung 4.10: Beispiele des Kraft-Durchbiegungs-Verlaufs bei Scheibenbelastung a) OSB-03, b) PLY-BB, c) PLY-ID, d) PLY-KQ, e) PLY-PO, f) PLY-RP, g) SWP-3F

4.4 Ergebnisse der Querschnittsmessreihe

4.4.1 Charakteristische Werte des statischen Biegeversuchs

Um die verschiedenen Gruppen (Werkstoff und Belastungsrichtung) gegenüberstellen zu können, werden charakteristische Werte aus den verteilten Kennwerten (bezogenen Größen) der jeweiligen Gruppe gebildet. Da es sich bei den bezogenen Größen nicht um Dimensionierungsgrößen im Sinn des Eurocodes⁵¹ handelt, können die charakteristischen Werte frei gewählt werden. Als sinnvoll wird die Darstellung der Lage- und Streumaße mit konventionellen Box-plots (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) erachtet. Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse sind geordnet nach bezogenen Verformungen, Kräften und Arbeitswerten (vgl. Tabelle 4.5).

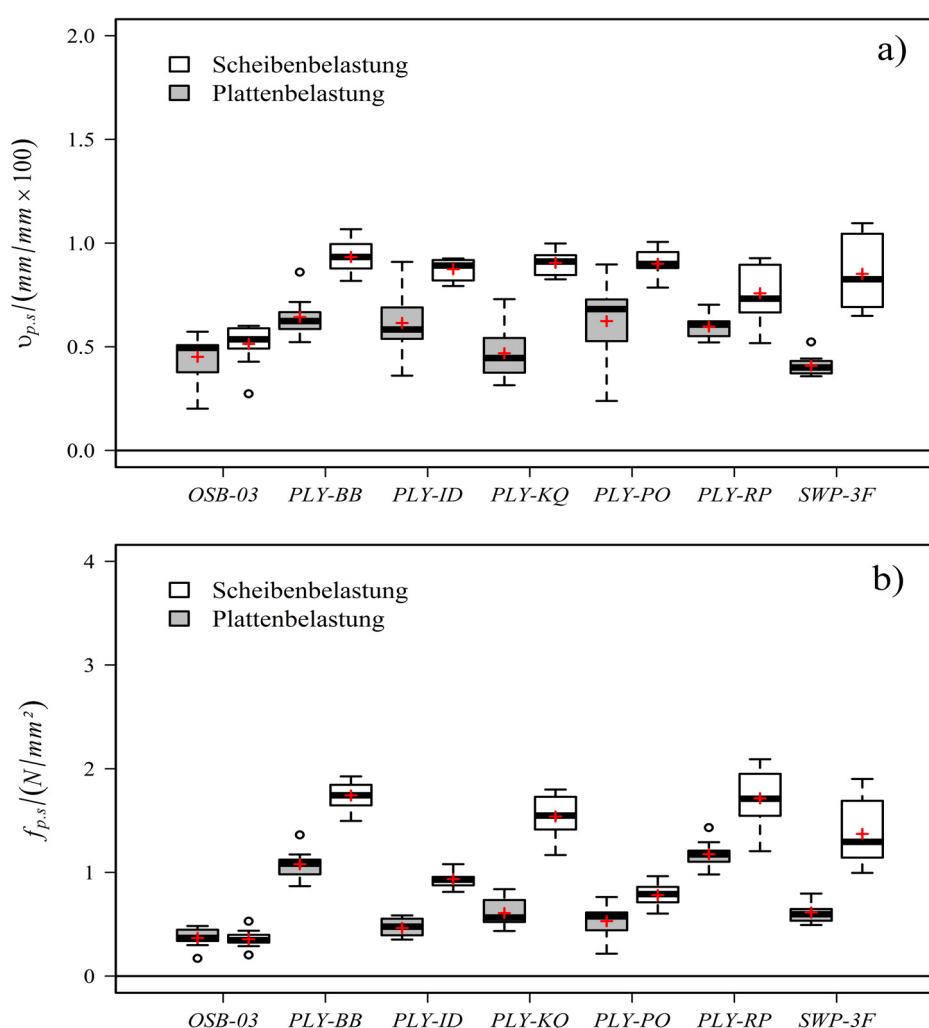


Abbildung 4.11: a) Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze bezogen auf den Widerlagerabstand im statischen Versuch. Querschnittsmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben der statistischen Lage- und Streumaße im Anlage I, Tabelle I.1; b) Kraft an der Proportionalitätsgrenze bezogen auf den individuellen Probenquerschnitt im statischen Versuch. Querschnittsmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben der statistischen Lage- und Streumaße im Anlage I, Tabelle I.2

⁵¹ Bei Bemessung nach [DIN EN 1995-1-1] werden diese in 5 % - Quantilen oder Mittelwerten angegeben.

Die Werkstoffgruppen und Belastungsrichtungen (vgl. Tabelle 3.3, S. 72) sind äquidistant in der Rubrikenachse aufgetragen. Die charakteristischen Werte der bezogenen Größen sind absolut (ohne Normierung auf die Dichte) angegeben. Die bezogenen Kräfte an der Proportionalitätsgrenze (vgl. Abbildung 4.11b) zeigen für PLY und SWP deutliche Unterschiede zwischen Platten- und Scheibenbelastung. Diese sind bei Scheibenbelastungen stets höher. Die Trennung der Boxen (Inter Quartil Ranges IQRs überschneiden sich nicht) zwischen Scheiben- und Plattenbelastung deutet auf eine relevante Effektgröße hin (vgl. Kapitels 3.9, S. 108). OSB-03 zeigt ein abweichendes Verhalten. Es zeigt sich, dass der lineare (elastische) Bereich verhältnismäßig unabhängig vom Werkstoff bis zu einer Durchbiegung von 0,5 – 1 % des Widerlagerabstands vorherrscht (vgl. Abbildung 4.11a). Lediglich OSB-03 weicht etwas nach unten ab.

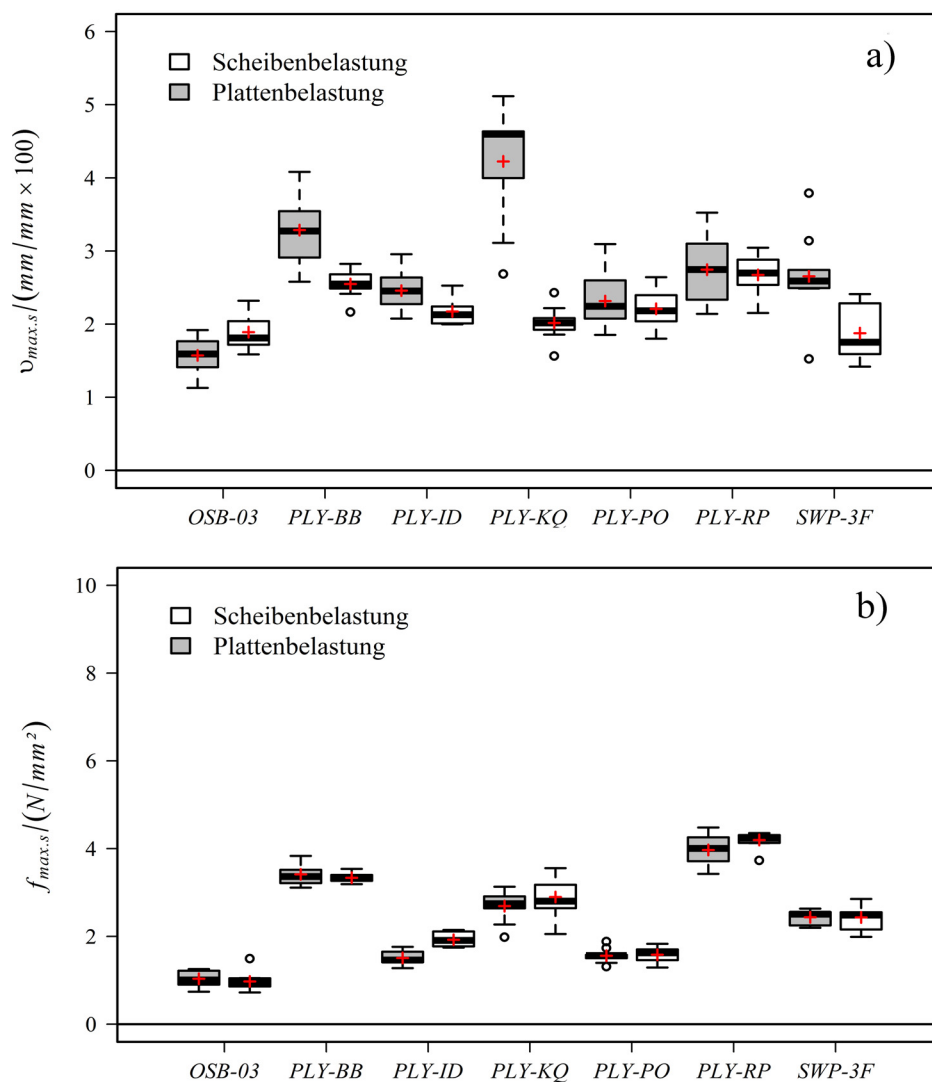


Abbildung 4.12: a) Durchbiegung bei Bruch bezogen auf den Widerlagerabstand im statischen Versuch. Querschnittsmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben der statistischen Lage- und Streumaße im Anlage I, Tabelle I.3; b) Bruchkraft bezogen auf den individuellen Probenquerschnitt im statischen Versuch. Querschnittsmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben der statistischen Lage- und Streumaße im Anlage I, Tabelle I.4

Weiterhin ist der linear elastische Bereich bei Scheibenbelastung in Bezug auf die Durchbiegung stets größer als bei Plattenbelastung. Wiederum zeigt sich bei OSB-03 ein abweichendes Verhalten. Hier fällt der Unterschied nicht so deutlich aus wie bei PLY und SWP. Eine deutlich differenzierte Gruppierung der Werkstoffe lässt sich aus der bezogenen Bruchkraft ableiten (vgl. Abbildung 4.12b). Unterschiede zwischen Scheiben- und Plattenbelastung sind hingegen nicht nachweisbar. Die bezogene Bruchkraft ist so ein Kennwert, der zur Differenzierung der Werkstoffe dienen kann. Im Hinblick auf den Vergleich zum Schlagversuch ist dieser Kennwert ebenso geeignet. Sowohl im statischen Biegeversuch wie auch im Schlagversuch ist eine Maximalkraft bzw. eine Bruchkraft zu identifizieren. Die bezogene Durchbiegung bei Erreichen der Bruchkraft lässt hingegen keine eindeutige Differenzierung der Werkstoffe zu (vgl. Abbildung 4.12a). Diese liegt im Mittel um 2 - 2,5 % des Widerlagerabstands. Einen deutlichen Ausreißer nach oben stellt PLY-KQ bei Plattenbelastung, mit im Mittel über 4 % des Widerlagerabstands, dar. Als Ursache hierfür kann einerseits der Schichtaufbau vermutet werden (vgl. Tabelle 3.3, S. 72). Dieser weist in Hauptrichtung fünf in Nebenrichtung nur zwei Lagen auf. Hierin unterscheidet sich PLY-KQ von den anderen PLY-Werkstoffen. Die Anzahl deren Lagen in Haupt- und Nebenrichtung unterscheidet sich jeweils nur um eine Lage. Andererseits kann angenommen werden, dass auch das Eindringen des Biegestempels in das weiche Fichtenholz bei Plattenbelastung gerade bei diesem Werkstoff zu hohen Werten der gemessenen Durchbiegung führt (vgl. Abbildung 4.13). OSB-03 liegt im Mittel unterhalb der anderen beiden Gruppen, sowohl bei bezogener Bruchkraft wie auch bei der bezogenen Durchbiegung.

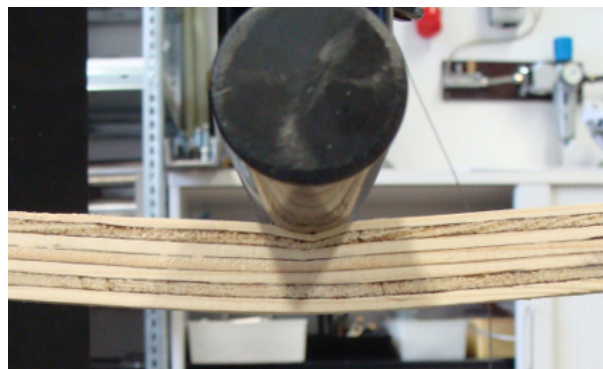


Abbildung 4.13: Eindringen des Biegestempels in das weiche Fichtenholz (Bildmitte) bei PLY-KQ Plattenbelastung

Ein differenziertes Bild der Werkstoffe ergibt sich neben der Bruchkraft auch für die Bruchenergien in den verschiedenen Bereichen der F-u-Verläufe (vgl. Abbildung 4.5). Um die Größenordnung der in den drei Bereichen aufgenommenen Arbeiten gegenüberstellen zu können, wurde die Achsenskalierung in Abbildung 4.14a bis c gleich vorgenommen. Es zeigt sich, dass die Arbeit im linearen Bereich $w_{lin,s}$ deutlich kleiner ist, als die im nichtlinearen $w_{nlb,s}$ und im Restbruchbereich $w_{rbb,s}$, vorausgesetzt ein Restbruch tritt überhaupt auf. Bei PLY-PO trat teilweise eine abrupte und vollständige Trennung der Biegeprobe nach der Bruchkraft ein. So ist hier die Restbruchkraft teilweise gleich Null. Es zeigt sich, dass die Gesamtbruchenergie $w_{B,s}$ im Mittel

bei Plattenbelastung der PLY-Werkstoffe (außer PLY-PO) stets höher ist als bei Scheibenbelastung. Die Ergebnisse für OSB und SWP lassen hierzu keine Aussagen zu. Die Gesamtbrucharbeit in Abbildung 4.14d lässt eine Differenzierung der einzelnen Werkstoffe und der Belastungsrichtung zu. Weiterhin ist die Gesamtbrucharbeit bei Plattenbelastung im Mittel stets höher als in Scheibenbelastung. Die IQRs der Gruppen bei beiden Belastungsrichtungen überschneiden sich bei den PLY-Werkstoffen (außer bei PLY-PO) nicht. OSB und SWP zeigen hingegen keine eindeutige Differenzierung von Scheiben- und Plattenbelastung bei der Gesamtbrucharbeit.

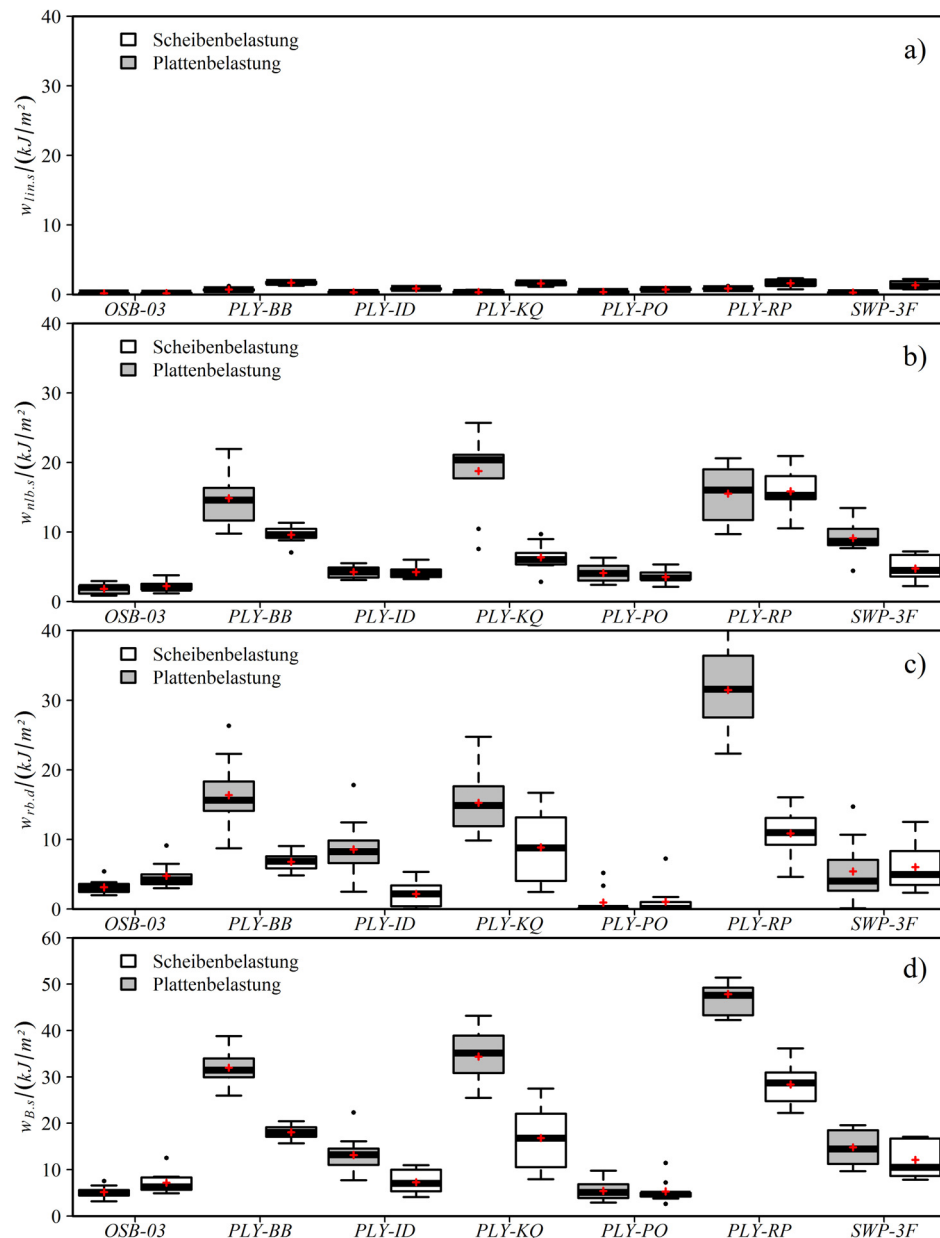


Abbildung 4.14: Arbeitsaufnahme in den verschiedenen Bereichen (a bis c) und Gesamtbrucharbeit (d) bezogen auf den individuellen Probenquerschnitt im statischen Versuch. Querschnittsmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben der statistischen Lage- und Streumaße im Anlage I, Tabelle I.5

An dieser Stelle kann bereits angemerkt werden, dass die kurz brechenden Werkstoffe (OSB-03 und PLY-PO, vgl. Abbildung 4.1, S. 113) die geringsten Bruchkräfte (vgl. Abbildung 4.12) und mit Abstand die geringsten Bruchenergien (vgl. Abbildung 4.14d) aufweisen. In gewisser Weise bestätigt sich dies beim Blick auf die gemessenen Bruchlängen (vgl. Kapitel 3.4, S. 77). Diese liegen generell im Bereich um 20 % des Widerlagerabstands (vgl. Abbildung 4.15), die Werte für OSB-03 und PLY-PO liegen im Mittel etwas niedriger. Aufgrund der teils großen Streuungen können aber keine weiteren sicheren Aussagen zur Charakteristik der Bruchlängen der verschiedenen Werkstoffe getroffen werden.

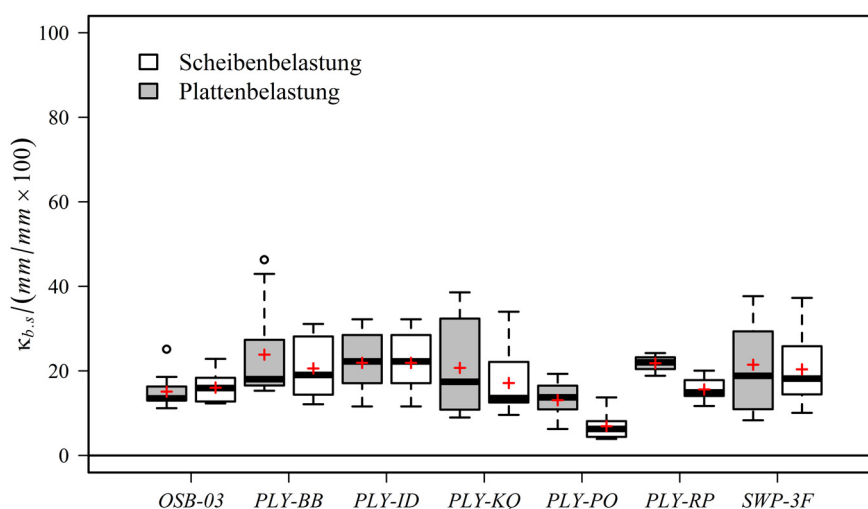


Abbildung 4.15: Auf den Widerlagerabstand bezogene Bruchlänge im statischen Querschnittversuch, Zahlenangaben siehe Anlage I, Tabelle I.6

Bruchkraft und Bruchenergie differenzieren die Werkstoffe deutlich. Darüber hinaus zeigt sich auch in der Korrelation zwischen beiden (vgl. Abbildung 4.16a) ein mäßig hohes korrigiertes Bestimmtheitsmaß (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) mit $R^2 = 0,65$. Wohingegen die bezogenen Größen aus den Verformungskennwerten keine Differenzierung zulassen. Besonders die bezogene Bruchlänge, die dazu eingeführt wurde um ggf. vorhandene unterschiedliche Charakteristiken im Bruchbild zu identifizieren, korreliert nicht mit der Bruchenergie $R^2 = 0,187$ (vgl. Abbildung 4.16b). Um weitere lineare Abhängigkeiten⁵² der bezogenen Größen des statischen Versuchs untereinander zu identifizieren, wurden diese mit sich selbst korreliert. Genutzt wurden dazu die Mittelwerte der bezogenen Größen über die Gruppen (Werkstoffe und Belastungen). Als Maß für die Korrelation jeweils zweier bezogener Größen wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 (vgl. auch Abbildung 4.16) genutzt. In Tabelle 4.8 ist die symmetrische Matrix von R^2 der korrelierten bezogenen Größen des statischen Versuchs angegeben. Zur besseren Kenntlichmachung ist der

⁵² Gemeint sind nicht kausale Zusammenhänge. Bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 1$ kann von einer zu 100 % wahrscheinlichen linearen Abhängigkeit beider Größen ausgegangen werden.

Grad der Korrelation, die Höhe des Bestimmtheitsmaßes, zusätzlich zur Zahlenangabe mit einer Farbskala (von grün: niedriges R^2 nach rot: hohes R^2) hinterlegt.

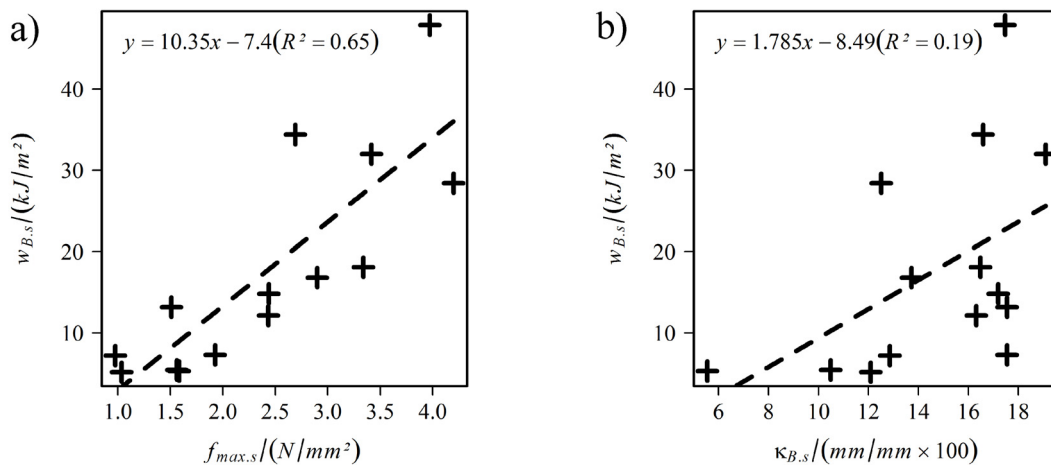


Abbildung 4.16: Korrelation zwischen bezogener Brucharbeit und a) bezogener Maximalkraft b) bezogener Bruchlänge für den statischen Versuch

Es lassen sich die folgenden Feststellungen treffen. Es korreliert: i) die im linearen Bereich aufgenommene Arbeit stark mit der Kraft an der Proportionalitätsgrenze ($R^2 = 0,957$), ii) die im nichtlinearen Bereich aufgenommene Arbeit mäßig mit der Bruchkraft ($R^2 = 0,666$) und der Durchbiegung bei Bruchkraft ($R^2 = 0,717$), iii) die Bruchkraft mäßig mit der Kraft an der Proportionalitätsgrenze ($R^2 = 0,611$) und iv) die im nichtlinearen und Restbruchbereich aufgenommenen Arbeit stark mit der Gesamtbrucharbeit ($R^2 = 0,825$ und $R^2 = 0,903$). Es wird deutlich, dass die gesamte zum Bruch notwendige Arbeit vom Restbruchverhalten bzw. von der Höhe der Arbeit im Restbruchbereich bestimmt wird.

Tabelle 4.8: Bestimmtheitsmaß⁵³ R^2 der korrelierten bezogenen Größen des statischen Biegeversuchs

Bezogene Größen des statischen Versuchs (vgl. Tabelle 4.5, S. 120)									
	$f_{p,s}$	$v_{p,s}$	$f_{max,s}$	$v_{max,s}$	$w_{lin,s}$	$w_{nlb,s}$	$w_{rbb,s}$	$w_{B,s}$	$\kappa_{b,s}$
$f_{p,s}$	1	0,468	0,611	-0,081	0,957	0,089	0,000	0,079	-0,051
$v_{p,s}$		1	-0,014	-0,001	0,621	-0,055	-0,039	-0,055	-0,047
$f_{max,s}$			1	0,185	0,413	0,666	0,440	0,650	0,091
$v_{max,s}$				1	-0,076	0,717	0,227	0,453	0,093
$w_{lin,s}$					1	-0,018	-0,065	-0,026	-0,080
$w_{nlb,s}$						1	0,536	0,825	0,118
$w_{rbb,s}$							1	0,903	0,187
$w_{B,s}$								1	0,187
$\kappa_{b,s}$									1

⁵³ Da das korrigierte Bestimmtheitsmaß genutzt wird (vgl. Kapitel 3.9, S. 108) sind auch negative Werte möglich.

4.4.2 Charakteristische Werte aus dem Schlagversuch

Die aus dem Trägheitsmaximum des Schlagversuches ermittelten bezogenen Kräfte und Verformungen der Querschnittmessreihe (vgl. Abbildung 4.8, S. 123) zeigen keine ausgeprägte Materialcharakteristik (vgl. Abbildung 4.17a und b). Die Kraftwerte des Trägheitsmaximums sind bei Scheibenbelastung im Mittel stets höher als bei Plattenbelastung. Die bis zum Trägheitsmaximum zurückgelegten Wege unterscheiden sich nicht wesentlich zwischen den Werkstoffen und Belastungsrichtungen. Da auch die Trägheit der Proben eines Werkstoffes für beide Belastungsrichtungen gleich ist, bleibt als Erklärung für die sich stark unterscheidenden bezogenen Kraftwerte zwischen Scheiben- und Plattenbelastung nur die unterschiedliche Steifigkeit. Tatsächlich sind die Steifigkeiten der verschiedenen Holzwerkstoffe (bis auf OSB-03 und PLY-PO) bei Scheibenbelastung höher als bei Plattenbelastung (vgl. Abbildung 4.24, S. 140). Da aber auch bei diesen Werkstoffen die Kraftüberhöhung bei Scheibenbelastung auftritt, müssen hier weitere Effekte zusätzlich zum Tragen kommen, deren Erklärung offen bleiben muss.

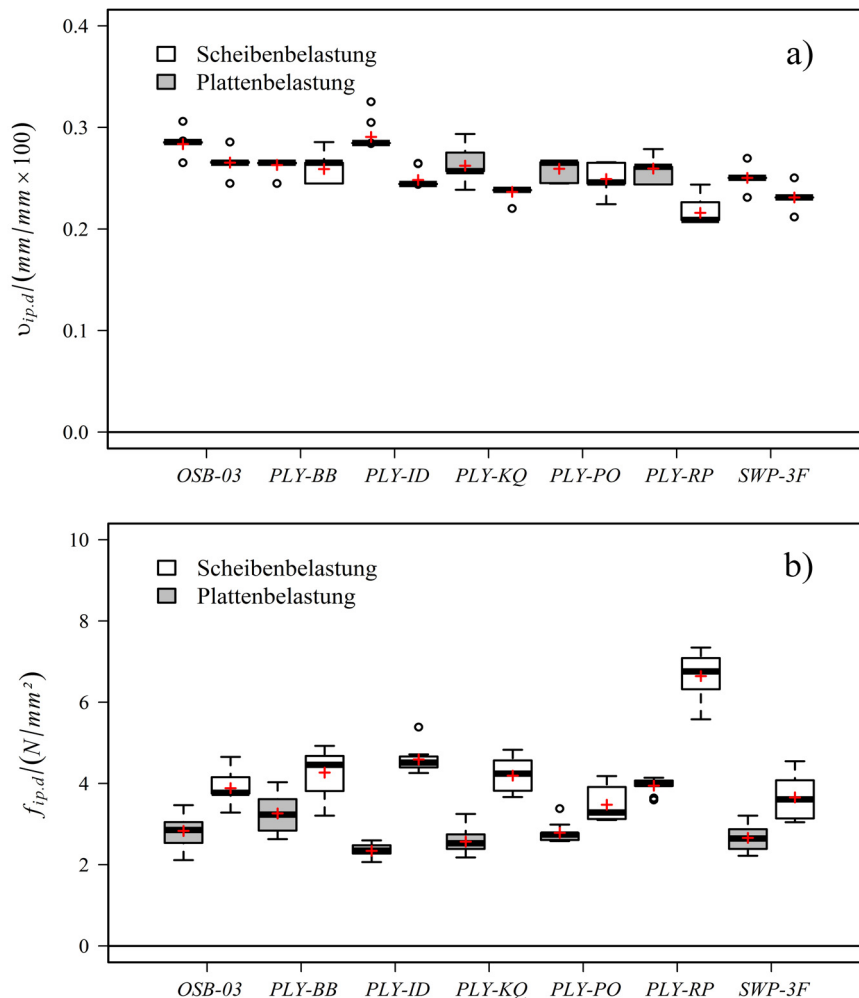


Abbildung 4.17: a) Durchbiegung am Trägheitsmaximum bezogen auf den Widerlagerabstand, Zahlenangaben zur Statistik siehe Anlage II, Tabelle II.1 b) Auf die Querschnittsfläche bezogene Kraft des Trägheitsmaximums (inertial peak) der Querschnittmessreihe, Zahlenangaben zur Statistik siehe Anlage II, Tabelle II.2

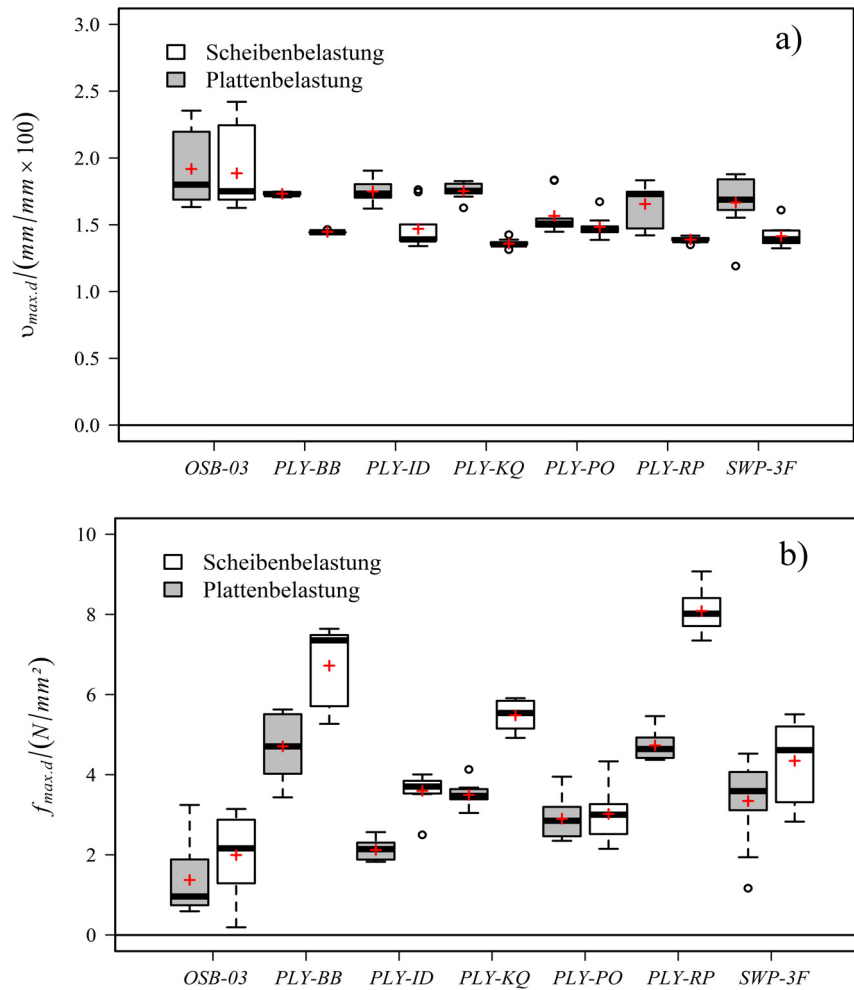


Abbildung 4.18: a) Durchbiegung bei Kraftmaximum bezogen auf den Widerlagerabstand, Zahlenangaben zur Statistik siehe Anlage II, Tabelle II.3 b) Bruchkraft bezogen auf die Querschnittsfläche über die Querschnittsmessreihe, Zahlenangaben siehe Anlage II, Tabelle II.4

Eine deutliche Materialcharakteristik zeigt sich bei der Bruch- / bzw. Maximalkraft im Schlagversuch (vgl. Abbildung 4.18b). Hier ist analog zum statischen Versuch eine Differenzierung der Werkstoffe möglich. Auffällig ist auch hier die teils deutliche Überhöhung der bezogenen Bruchkräfte bei Scheibenbelastung (außer PLY-PO). Dieser Effekt steht im Einklang mit der Überhöhung der Kraft am Trägheitsmaximum bei Scheibenbelastung (vgl. Abbildung 4.17). Die bis zur Bruchkraft auftretende bezogene Durchbiegung ist bei Scheibenbelastung im Mittel bei allen Werkstoffen niedriger als bei Plattenbelastung (vgl. Abbildung 4.18a). Wohingegen eine Differenzierung der Werkstoffe anhand der bezogenen Bruchdurchbiegung nicht erfolgen kann. Die Werte der Bruchdurchbiegung liegen unabhängig vom Werkstoff im Mittel im Bereich von 1,5 % - 2 % des Widerlagerabstands.

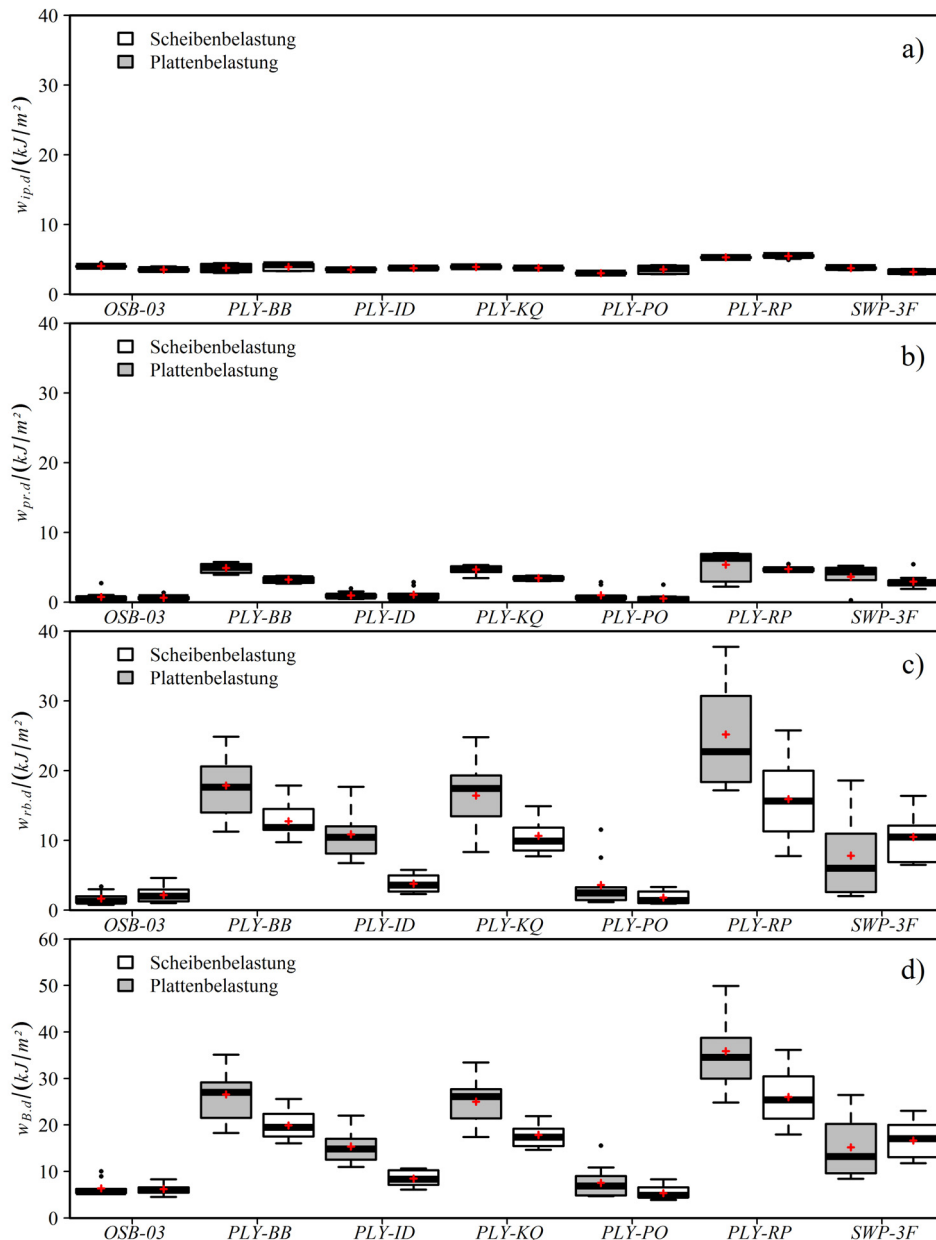


Abbildung 4.19: Arbeitsaufnahme in den verschiedenen Bereichen (a bis c) und Gesamtbrucharbeit (d) bezogen auf den individuellen Probenquerschnitt im Schlagversuch. Querschnittmessreihe mit Proben im Normklima konditioniert. Zahlenangaben siehe Anlage II, Tabelle II.5

Bei der Arbeitsaufnahme in den verschiedenen Bereichen des F-u-Kurvenverlaufs des Schlagversuchs wird deutlich, dass die Bereiche des inertial peak und prior to rupture im Vergleich zur Restbrucharbeit nur einen geringen Anteil ausmachen (vgl. Abbildung 4.19). So bestimmt hier die Restbruchenergie wesentlich die Charakteristik der Werkstoffe. Dies ist, wenn auch nicht ganz so ausgeprägt, ebenso im statischen Versuch der Fall. Bei der Gesamtbruchenergie zeigt sich, in Analogie zum statischen Versuch, eine Differenzierung der Werkstoffe zueinander. Ebenso ist eine Differenzierung der Gesamtbruchenergie durch die Belastungsrichtung festzustellen. Bei den Werkstoffen PLY-BB, PLY-ID, PLY-KQ und PLY-RP liegt diese bei Plattenbelastung im Mittel deutlich höher als bei Scheibenbelastung. Bei höheren Bruchkräften

(Scheibenbelastung vgl. Abbildung 4.18b) treten so niedrigere Brucharbeiten auf. Dies deutet darauf hin, dass die Werkstoffe bei Scheibenbelastung eine geringere bezogene Durchbiegung ertragen als bei Plattenbelastung, was sich auch aus Abbildung 4.18a entnehmen lässt.

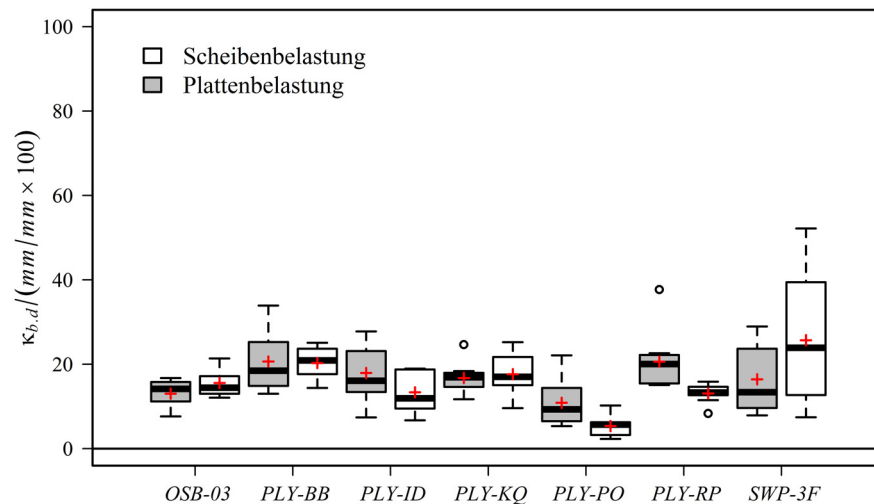


Abbildung 4.20: Auf den Widerlagerabstand bezogene Bruchlänge, Zahlenangaben siehe Anlage II, Tabelle II.6

Die Analyse der bezogenen Bruchlängen ergibt ein dem statischen Versuch ähnliches, wenn auch nicht differenzierendes Bild (vgl. Abbildung 4.20 und Abbildung 4.15, S. 130). Die Bruchlängen liegen unabhängig vom Werkstoff im Bereich von 20 % des Widerlagerabstands und weisen teils deutliche Streuungen auf. Auch Unterschiede zwischen Scheiben- und Plattenbelastung lassen sich nicht ableiten. Eine Korrelation zwischen Gesamtbrucharbeit und Bruchlänge (vgl. Abbildung 4.21b) lässt sich mit $R^2 = 0,27$ ebenso nicht nachweisen. Auffällig ist hingegen, dass die bezogene Bruchkraft nicht in dem Maß mit der Brucharbeit korreliert ($R^2 = 0,35$) wie beim statischen Versuch ($R^2 = 0,65$ vgl. Abbildung 4.16, S. 131).

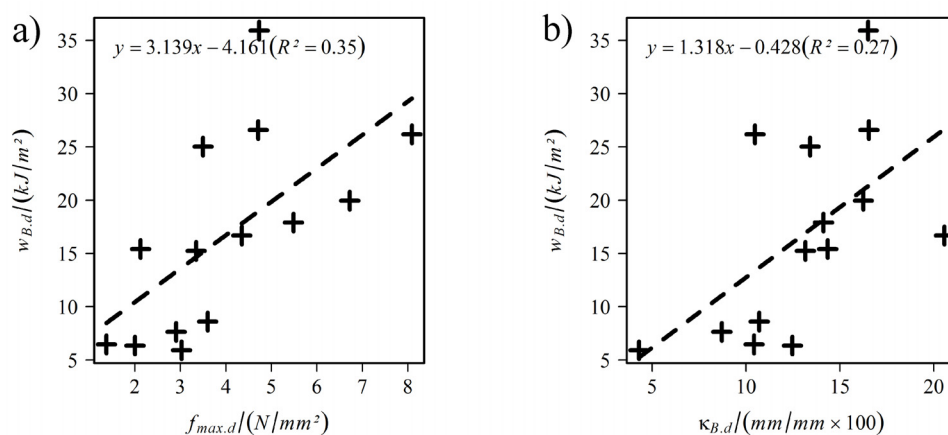


Abbildung 4.21: Korrelation zwischen bezogener Brucharbeit und a) bezogener Maximalkraft b) bezogener Bruchlänge für den Schlagversuch

In Analogie zum statischen Biegeversuch (vgl. Tabelle 4.8) werden auch die bezogenen Größen des Schlagversuchs (vgl. Tabelle 4.7) mit sich selbst korreliert. So können auch hier lineare Abhängigkeiten der bezogenen Größen identifiziert werden. Es zeigt sich, dass i) die Maximalkraft schwach mit der Kraft am Trägheitsmaximum korreliert ($R^2 = 0,560$), ii) die bezogene Durchbiegung bei Maximalkraft mäßig mit der bezogenen Durchbiegung am Trägheitsmaximum korreliert ($R^2 = 0,610$) und iii) die aufgenommene Arbeit im Bereich prior to rupture und im Restbruchbereich stark mit der Gesamtbrucharbeit korrelieren ($R^2 = 0,868$ und $R^2 = 0,988$). Letzteres erklärt sich dadurch, dass die Gesamtbrucharbeit eine summierte Größe der einzelnen Arbeiten ist, zeigt aber auch im Vergleich zum statischen Versuch, dass die Gesamtbrucharbeit deutlich durch das Restbruchverhalten charakterisiert wird.

Tabelle 4.9: Bestimmtheitsmaß R^2 der korrelierten bezogenen Größen des Schlagversuchs

Bezogene Größen des Schlagversuchs (vgl. Tabelle 4.7, S. 124)									
	$f_{ip,d}$	$v_{ip,d}$	$f_{max,d}$	$v_{max,d}$	$w_{ip,d}$	$w_{pr,d}$	$w_{rb,d}$	$w_{B,d}$	$K_{b,d}$
$f_{ip,d}$	1	0,500	0,560	0,296	0,332	0,004	-0,037	-0,009	-0,081
$v_{ip,d}$		1	0,468	0,610	0,004	0,085	-0,057	-0,031	-0,083
$f_{max,d}$			1	0,460	0,273	0,423	0,291	0,345	0,001
$v_{max,d}$				1	-0,075	-0,039	-0,069	-0,064	-0,083
$w_{ip,d}$					1	0,323	0,356	0,424	-0,081
$w_{pr,d}$						1	0,800	0,868	0,232
$w_{rb,d}$			Sym.				1	0,988	0,303
$w_{B,d}$								1	0,268
$K_{b,d}$									1

4.4.3 Vergleich von statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch

Es wurde an einigen Stellen der vorhergehenden Kapitel bereits deutlich, dass Analogien der bezogenen Größen von statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch vorhanden sind. So konnte in beiden Fällen festgestellt werden, dass eine Differenzierung der Werkstoffe nur mittels der bezogenen Bruchkräfte und Bruchenergien vorgenommen werden kann. Bezogene Größen die aus Verformungen bestimmt wurden, wie die bezogene Bruchdurchbiegung und auch die bezogene Bruchlänge liefern keine Differenzierungsmöglichkeit zwischen den verschiedenen Werkstoffen. Dies ist bei statischem und schlagartigem Versuch gleichermaßen der Fall. Auch liegen vergleichbare Kennwerte der beiden Versuche, so die Restbruch- und Gesamtenergien, die Bruchkräfte, die Bruchdurchbiegung und die Bruchlänge in den gleichen zahlenmäßigen Größenordnungen. Im Folgenden wird detailliert ein Vergleich der Ergebnisse vorgenommen. Um weitere lineare Abhängigkeiten zwischen den beiden Versuchsarten zu identifizieren, ist eine Möglichkeit die Bildung einer Korrelationsmatrix aller bezogener Größen. Zusätzlich wird in diese Korrelation die Dichte der Werkstoffe mit aufgenommen, um gegebenenfalls auftretende

lineare Dichteabhängigkeiten⁵⁴ zu identifizieren (vgl. Tabelle 4.10). Da jede Probe nur einmal geprüft werden kann (statisch oder schlagartig), ist ein Vergleich der Gruppe nur anhand charakteristischer Werte (hier die Mittelwerte) und nicht individuell für jede Probe möglich. Die Darstellung der Korrelation erfolgt analog zu den in den beiden vorhergehenden Kapiteln angeführten Korrelationsmatrizen.

Tabelle 4.10: Bestimmtheitsmaß R^2 der korrelierten bezogenen Größen des statischen und des Schlagversuchs

		Horizontal: Bezogene Größen des Schlagversuchs									
		Vertikal: Bezogene Größen des statischen Biegeversuchs									
		$f_{ip,d}$	$v_{ip,d}$	$f_{max,d}$	$v_{max,d}$	$w_{ip,d}$	$w_{pr,d}$	$w_{rb,d}$	$w_{B,d}$	$\kappa_{B,d}$	$\rho_{p,d}$
$f_{p,s}$		0,483	0,448	0,874	0,593	0,128	0,279	0,204	0,236	0,082	0,061
$v_{p,s}$		0,220	0,214	0,231	0,699	-0,080	-0,080	-0,083	-0,082	-0,083	-0,080
$f_{max,s}$		0,244	0,223	0,766	0,151	0,456	0,829	0,730	0,793	0,117	0,235
$v_{max,s}$		-0,061	-0,082	-0,016	-0,068	-0,019	0,385	0,354	0,355	-0,056	-0,067
$w_{lin,s}$		0,505	0,466	0,774	0,694	0,046	0,112	0,064	0,084	0,019	-0,005
$w_{nlb,s}$		-0,024	-0,015	0,292	-0,079	0,354	0,826	0,723	0,777	0,019	0,135
$w_{rb,s}$		-0,074	-0,083	0,037	-0,066	0,390	0,579	0,837	0,817	0,181	0,259
$w_{B,s}$		-0,043	-0,066	0,189	-0,083	0,449	0,798	0,921	0,936	0,139	0,251
$\kappa_{B,s}$		-0,072	-0,057	-0,052	-0,063	-0,064	0,213	0,283	0,257	0,594	0,048
$\rho_{p,s}$ *		0,245	-0,083	0,177	-0,066	0,632	0,177	0,311	0,334	0,017	0,982

* Da sich die Dichten der einzelnen Werkstoffchargen zwischen statischem und Schlagversuch nur marginal unterscheiden, ist es legitim die eigentlich dem Schlagversuch zugeordneten Dichten mit den bezogenen Größen des statischen Versuchs zu korrelieren und entgegengesetzt.

Es zeigt sich eine Reihe an starken Korrelationen der Mittelwerte der bezogenen Größen aus beiden Versuchen. Zunächst rücken nochmals die Korrelationen der Arbeitsaufnahme in den verschiedenen Phasen des Bruchgeschehens in den Blick. So korreliert die Arbeitsaufnahme im nichtlinearen Bereich des statischen Versuchs mit der des Bereichs prior to rupture im Schlagversuch mit $R^2 = 0,826$, wie auch die Restbrucharbeiten beider Versuche mit $R^2 = 0,837$ und am deutlichsten die aufsummierte Gesamtbrucharbeit beider Versuche mit $R^2 = 0,936$. Die Arbeitsaufnahme während des Trägheitsmaximums (inertial peak) im Schlagversuch korreliert mäßig nur mit der Dichte des jeweiligen Werkstoffs ($R^2 = 0,632$). Dies scheint schlüssig, da dieser Kraftanstieg während des Schlagversuchs wesentlich auf die Trägheit der Probe zurückzuführen ist, wie der Name bereits aussagt. Unerwartet zeigt sich, dass die Arbeitsaufnahme bis zur Proportionalitätsgrenze im statischen Versuch mäßig aber doch deutlich ($R^2 = 0,774$ und $R^2 = 0,694$) mit den bezogenen Kraft- und Verformungsgrößen des Kraftmaximums im Schlagversuch korreliert. Die bezogenen Maximal- (Bruch-) Kräfte beider Versuche korrelieren jedoch mit $R^2 = 0,766$ auch mäßig. Noch deutlicher hingegen korreliert die bezogene Maximalkraft im Schlagversuch mit der bezogenen Kraft an der Proportionalitätsgrenze im statischen Versuch ($R^2 = 0,874$). Im Gegenzug

⁵⁴ Eine Zielstellung der Arbeit ist die Analyse von **Relationen** zwischen charakteristischen Werten bezogener Größen des statischen und des Schlagversuchs. Ausgehend davon entfallen weiterführende Analysen die höhergradige (nichtlineare) Abhängigkeiten der Größen zueinander berücksichtigen.

korreliert aber die bezogene Bruchkraft des statischen Versuchs stark mit der Arbeitsaufnahme im Bereich prior to rupture ($R^2 = 0,829$), im Restbruchbereich mäßig ($R^2 = 0,730$) und in Folge der Aufsummierung auch mit der Gesamtbrucharbeit mäßig bis stark ($R^2 = 0,793$) im Schlagversuch. Für die bezogenen Bruchlängen ließ sich bei statischer und schlagartiger Belastung bisher weder eine individuelle Werkstoffcharakteristik ableiten (vgl. Abbildung 4.15, S. 130 und Abbildung 4.20, S. 135), noch ist in den Korrelationen eine Abhängigkeit zu einer anderen bezogenen Größe erkennbar (vgl. Tabelle 4.8, S. 131 bis Tabelle 4.10). Jedoch korrelieren die Bruchlängen zwischen statischem und Schlagversuch mit ($R^2 = 0,594$) mäßig. Zusammenfassend lassen sich folgende Schlüsse ziehen: i) es existiert eine lineare Abhängigkeit der Maximal- (Bruch-) Kräfte im statischen und im schlagartigen Lastfall, ii) es existiert eine lineare Abhängigkeit der Bruchkräfte im statischen und der Gesamtbrucharbeit im schlagartigen Lastfall, iii) die Arbeitsaufnahmen in den vergleichbaren Abschnitten der beiden Versuche (nichtlinearer Bereich mit prior to rupture Bereich und die Restbruchbereiche) sowie in der Folge die Gesamtbrucharbeit sind ebenfalls linear abhängig und iv) zwischen den Bruchlängen besteht ebenso eine, wenn auch schwächere, lineare Abhängigkeit. Für die in diesem letzten Absatz genannten Abhängigkeiten werden nochmals die Modelle der linearen Regression angegeben (vgl. Abbildung 4.22a bis d).

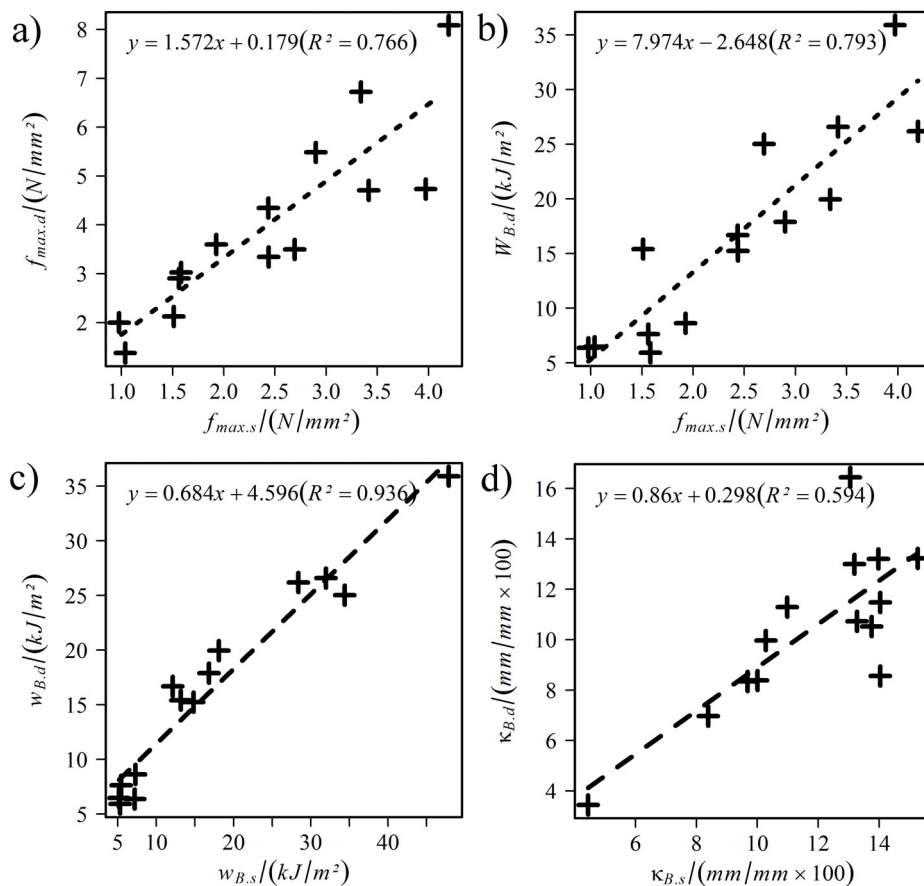


Abbildung 4.22: Modelle der linearen Regression der Mittelwerte der bezogenen Größen

Die Annahme, dass mit zunehmender Dichte der Unterschied zwischen statischem und dynamischem Prüfergebnis, infolge zunehmend wirkender Trägheitswirkung, vergrößert (vgl. Kapitel 3.5, S. 78), kann nicht bestätigt werden. So lässt sich aus den Differenzen⁵⁵ der Gesamtbrucharbeiten beider Versuche weder eine Tendenz noch eine einheitliche Charakteristik ableiten (vgl. Abbildung 4.23).

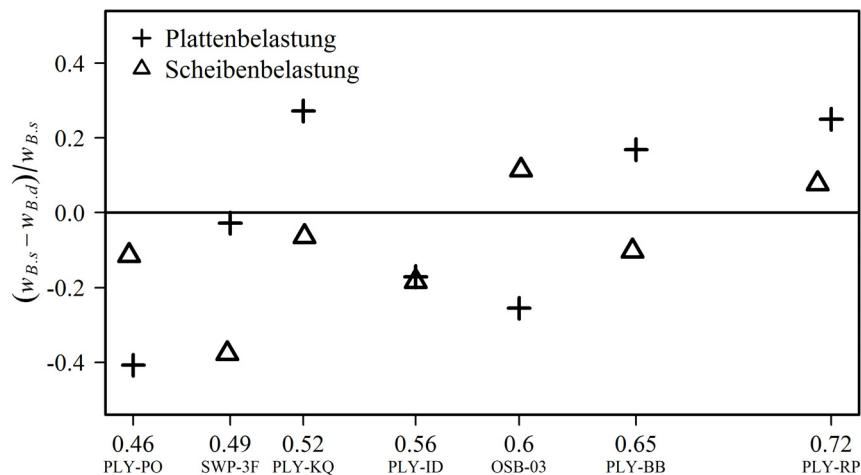


Abbildung 4.23: Differenz der Mittelwerte der Brucharbeit im statischen Biegeversuch $w_{B,s}$ und der Brucharbeit im Schlagversuch $w_{B,d}$ bezogen auf die statische Brucharbeit über der Dichte der Werkstoffe

4.4.4 E-Modul der Werkstoffe und Dichteabhängigkeit der Eigenschaften

In den Kapiteln 4.4.1, S. 126 und 4.4.2, S. 132 sind lediglich die Ergebnisse der Kennwerte angegeben, die zum Vergleich von statischem und Schlagversuch genutzt werden (vgl. Kapitel 4.4.3, S. 116). Der im statischen Versuch ermittelte E-Modul besitzt im Schlagversuch kein Äquivalent. Infolge der schlagartigen Belastung nimmt die gemessene Kraft nahezu ohne Zeitverzögerung zu. So ist es nicht möglich aussagekräftige Kraftanstiegsraten als Werkstoffsteifigkeit zu berechnen. Der in Kapitel 4.3.1, S. 116 entwickelte Algorithmus zur Bestimmung des linearen Bereichs erscheint dem Autor aber dennoch als ein wichtiges Ergebnis der Arbeit, auch wenn er mit der eigentlichen Bewertung der Schlagbelastung nicht im Zusammenhang steht. Demzufolge werden zunächst die Ergebnisse der E-Moduln angegeben. Ebenso erfolgt der Vergleich zwischen E-Modulbestimmung nach Norm und der E-Modulbestimmung nach dem angegebenen Verfahren unter Nutzung der Proportionalitätsgrenze (vgl. Kapitel 4.3.1, S. 116). In Abbildung 4.24 ist der aus der Proportionalitätsgrenze berechnete E-Modul der Werkstoffe bei Scheiben- und Plattenbelastung dargestellt. Dieser korreliert mit $R^2 = 0,99$ mit dem nach Norm

⁵⁵ Eine positive Differenz zwischen statischem Versuch und Schlagversuch bedeutet, dass der statische Versuch höhere Werte erbringt.

bestimmten E-Modul (vgl. Abbildung 4.25). Es zeigt sich, dass der in der Norm (vgl. [DIN EN 310]) angegebene Bereich zur Berechnung des E-Moduls (zwischen 10 % und 40 % der Bruchkraft) zur Deckung mit dem Bereich des linearen Kraftanstiegs kommt. Zumindest unterscheiden sich die nach den verschiedenen Methoden berechneten E-Moduln ($E_{p,s}$ und $E_{norm,s}$) nur marginal. Somit steht ein Verfahren zur Verfügung, das es erlaubt i) festzustellen, ob überhaupt ein lineares (elastisches⁵⁶) Verhalten des Werkstoffes vorliegt und ii) das es gestattet bei Vorhanden sein eines linearen Anteils des Kraft-Verformungs-Verlaufs die Proportionalitätsgrenze zu bestimmen. Dieses Verfahren kann Werkstoff unabhängig genutzt werden. Es wurde sich weiterhin dafür entschieden in der vorliegenden Arbeit keine dichtespezifischen Größen der Versuchsergebnisse anzugeben. Diese wurden nur zur Eingrenzung der Werkstoffgruppen genutzt (vgl. Kapitel 3.2.1, S. 69).

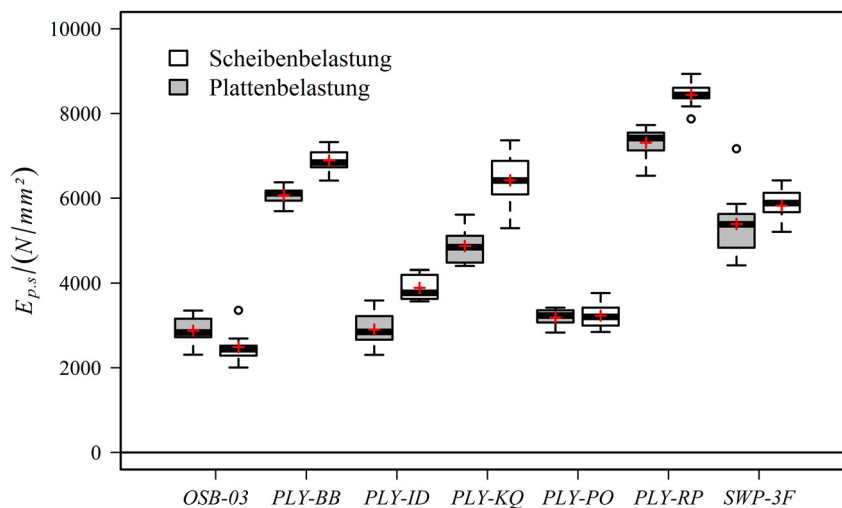


Abbildung 4.24: E-Modul bestimmt bis zur Proportionalitätsgrenze, Zahlenangaben zur Statistik siehe Anlage III, Tabelle III.1

Die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe im Sinne hoher mechanischer Kennwerte nimmt in vielen Fällen mit der Dichte zu (vgl. Kapitel 2.8.1, S. 48). Werden dichtespezifische Größen gebildet, egalisieren sich die Werkstoffcharakteristiken wesentlich. Eine Werkstoffauswahl kann so unter Leichtbaugesichtspunkten erfolgen. Im Falle sicherheitsrelevanter Bauteile, die im Versagensfall Lasten aufnehmen und Unfälle verhindern, ist der Leichtbaugedanke aber nicht primär. Entscheidend ist vielmehr die absolute Fähigkeit des Bauteils Belastungen zu ertragen ohne Rücksicht auf das Eigengewicht. Dennoch soll die Dichte der Werkstoffe im Verhältnis zu deren mechanischen Eigenschaften nicht unberücksichtigt bleiben. Ebenso sollen an dieser Stelle auch weitere strukturelle Eigenschaften, der sich teils stark unterscheidenden Holzwerkstoffe, im Kontext der Ergebnisse diskutiert werden.

⁵⁶ Lineares Verhalten der Kraft-Verformungs-Kurve ist wiederum kein Beweis für elastisches Verhalten. Der Nachweis des elastischen Bereiches kann mittels Laststeigerungsversuchen erfolgen.

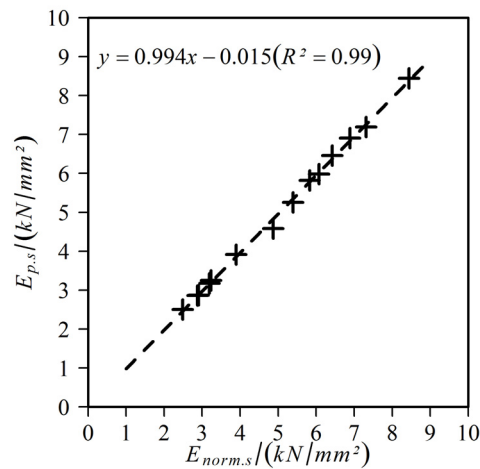


Abbildung 4.25: Nahezu perfekte Korrelation der Mittelwerte von $E_{p,s}$ und $E_{norm,s}$ mit $R^2 = 0.99$

In Abbildung 4.26 bis Abbildung 4.29 ist die Rubrikenachse dichteskaliert aufgetragen. Dies ermöglicht einen günstigen Überblick über die Variation der bezogenen Größen mit der Dichte. Es sind die vier bezogenen Größen dargestellt, die auch Eingang in das Klassenmodell (vgl. Kapitel 4.8.2, S. 155) finden.

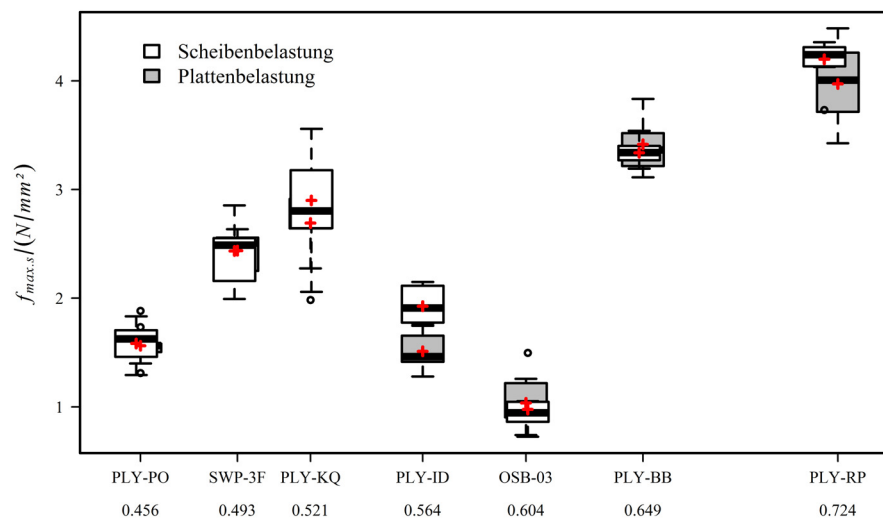


Abbildung 4.26: Auf die Querschnittfläche bezogene Bruchkraft im statischen Versuch, Rubrikenachse dichteskaliert

Es wird deutlich, dass für alle vier bezogenen Größen eine Zunahme dieser mit der Dichte vorhanden ist (vgl. Abbildung 4.26 bis Abbildung 4.29). Die Eigenschaften gruppieren sich mehr oder weniger streng um die Verbindungslinie zwischen PLY-PO (niedrigste Dichte) und PLY-RP (höchste Dichte). Die Werkstoffe PLY-ID und OSB-03 fallen jedoch stets aus dieser Zunahme heraus. Die mechanische Leistungsfähigkeit liegt in anbetracht ihrer Dichte deutlich niedriger. Bei OSB-03 kann dies mit der grundlegend verschiedenen Struktur, d. h. dem wesent-

lich höheren Aufschlußgrad des Holzes erklärt werden. Bei PLY-ID ist diese Annahme nicht möglich, da es prinzipiell den gleichen Schichtaufbau wie die übrigen PLY-Werkstoffe aufweist. Hier kann vermutet werden, dass die geringe Qualität der ausgewählten Furniere der Mittellagen ursächlich ist. Dies kann aus den Erfahrungen bei der Versuchsdurchführung bestätigt werden. Überproportional häufig wies dieser Werkstoff Fehlstellen im Schnittbild der Furnierlagen auf.

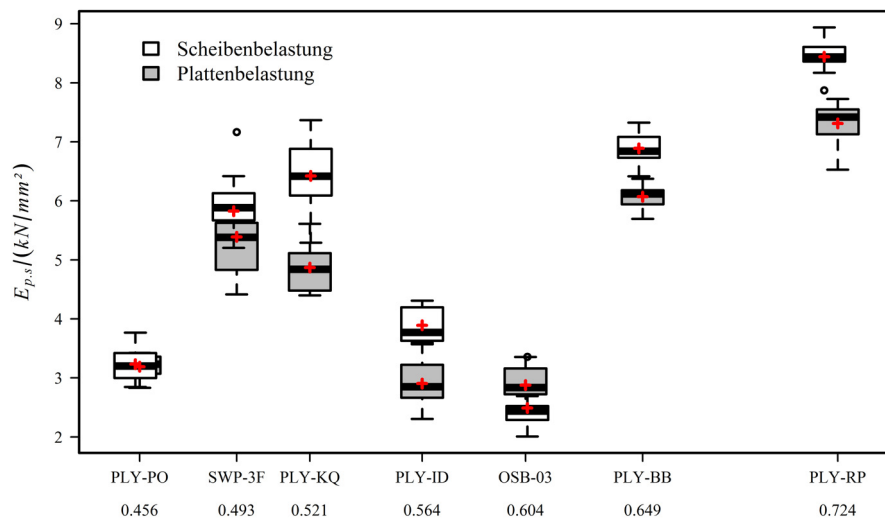


Abbildung 4.27: E-Modul ermittelt bis zur Proportionalitätsgrenze, statischer Versuch, Rubrikenachse dichteskaliert

Zum Einfluss des in den jeweiligen Werkstoffen verwendeten Klebstoffsystems lassen sich folgende Aussagen treffen: i) die mit Phenolharz verklebten Werkstoffe (PLY-KQ, PLY-BB, PLY-RP) erreichen im Mittel die höchsten Werte (einzige Ausnahme PLY-KQ bei $E_{p,s}$), ii) die Harnstoff- Melaminharz verklebten Platten liegen wertemäßig darunter und iii) das mit PMDI verklebte OSB-03 liegt immer an der unteren Grenze aller gemessenen Werte. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass die Klebstoffe nicht allein ursächlich für dieses Verhalten sind. Vielmehr beeinflussen neben Klebstoff und Qualität der Verklebung auch die Art und Qualität der Strukturbestandteile, die Holzart und damit die Dichte, aber vermutlich auch der Aufschlussgrad, integral die Eigenschaften des Holzwerkstoffes. Unerwartet zeigte sich auch ein jeweils deutlicher Unterschied zwischen der Werteausprägung von PLY-BB und PLY-RP. Liegt beiden Werkstoffen nach Herstellerangabe die Holzart Birke zugrunde, unterscheiden sich diese in ihrer Dichte doch merklich. Das charakteristische Verhalten beider Werkstoffe ist in allen Aspekten gleich, so die relativen Unterschiede zwischen Scheiben- und Plattenbelastung oder die Streubreiten.

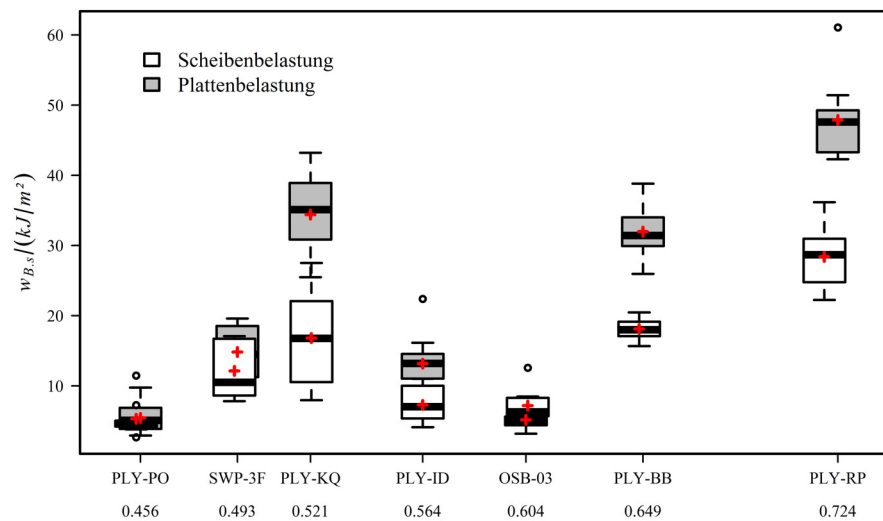


Abbildung 4.28: Brucharbeit bezogen auf die Querschnittfläche, statischer Versuch, Rubrikenachse dichteskaliert

So kann der absolute wertemäßige Unterschied beider Werkstoffe durch deren verschiedene Dichte erklärt werden. Bei Berücksichtigung des Betrages der Dichtedifferenz ($\sim 0,07 \text{ g/cm}^3$ für die Chargen im statischen und $\sim 0,05 \text{ g/cm}^3$ für die Chargen im Schlagversuch, vgl. Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2, S. 112) wird deutlich, wie sensitiv selbst scheinbar ähnliche Werkstoffe auf Dichtevariationen reagieren.

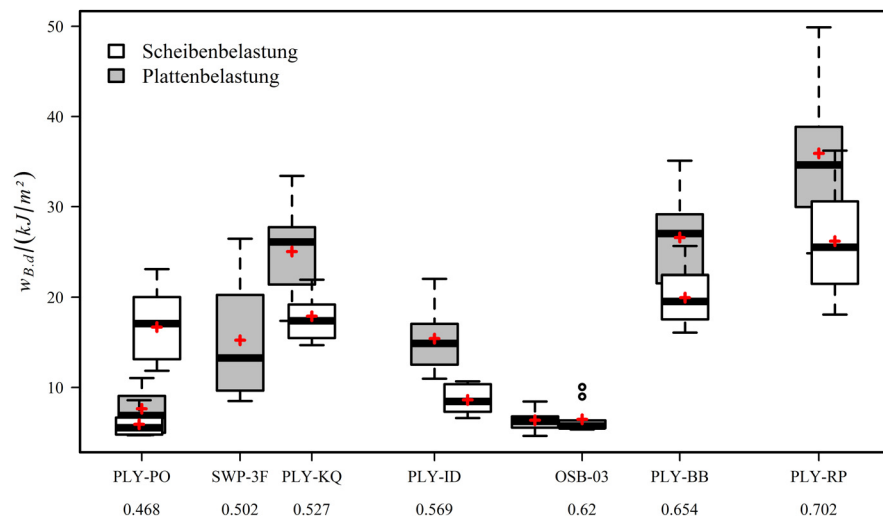


Abbildung 4.29: Brucharbeit bezogen auf die Querschnittfläche, Schlagversuch, Rubrikenachse dichteskaliert

4.5 Ergebnisse der Längsschnittmessreihe

4.5.1 Trockene Proben mit Reklimatisierung

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Längsschnittmessreihe angegeben. Dargestellt werden jeweils die charakteristischen Werte i) der Bruchlängen, ii) der auf die Querschnittfläche bezogenen Bruchkraft (bei gekerbten Proben der Restquerschnitt) und iii) der auf die Querschnittfläche bezogenen Brucharbeit (bei gekerbten Proben der Restquerschnitt). Diesen werden stets die entsprechenden charakteristischen Werte des gleichen Werkstoffs im ungekerbten normklimatisierten Zustand (vgl. Kapitel 4.4.2, S. 132) als Referenz gegenübergestellt. So lassen sich Veränderungen der charakteristischen Werte mit der jeweiligen Konditionierung leicht erkennen. Entsprechend Kapitel 3.1.2, S. 67 wurden die für diese Untersuchungen ausgewählten Proben der Längsschnittmessreihe thermisch geschädigt (vgl. Tabelle 3.8, S. 102). In Kapitel 4.2.2, S. 114 sind Dichte und Ausgleichsfeuchte der reklimatisierten Proben angegeben.

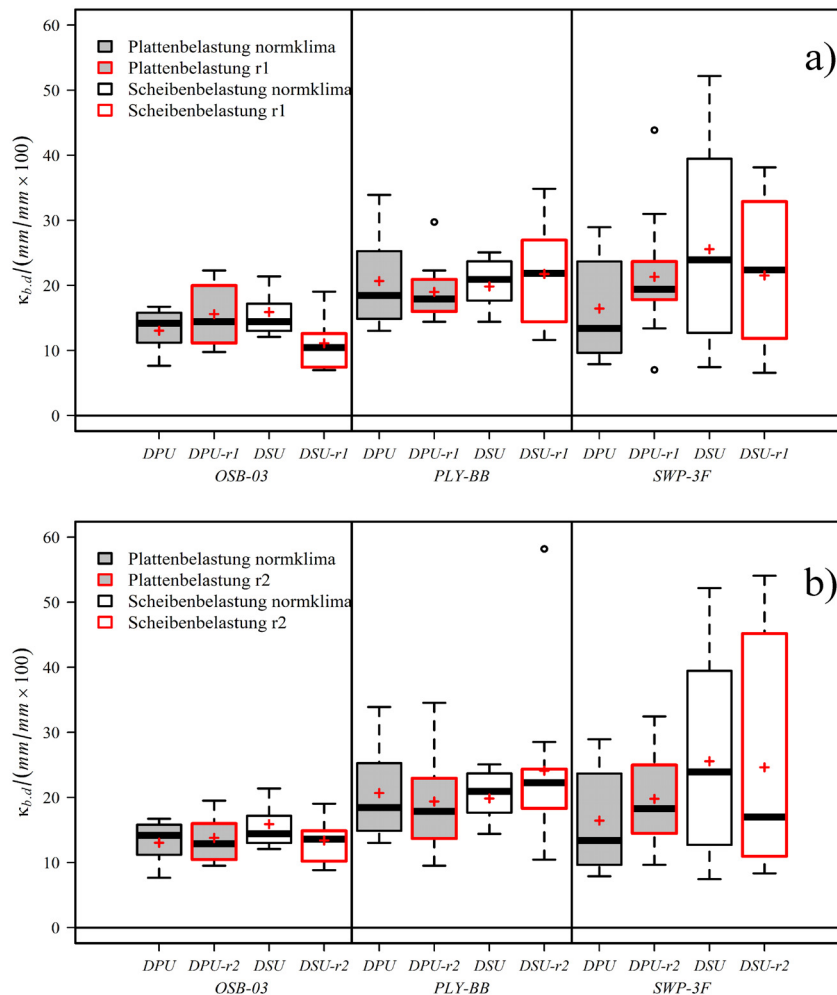


Abbildung 4.30: Bruchlänge bezogen auf den Widerlagerabstand, thermische Schädigung mit Reklimatisierung: a) Temperaturregime r1 (105 °C), b) Temperaturregime r2 (200 °C). Zahlenangaben siehe Anlage IV, Tabelle IV.1

Es zeigt sich, dass sich die Bruchlänge zwischen normklimatisierten und thermisch geschädigten Proben nicht unterscheidet (vgl. Abbildung 4.30). Sie liegt im Mittel wie auch in ihrer Streubreite in etwa im gleichen Bereich. Ein differenziertes Bild zeigt sich beim Vergleich der Bruchkräfte (vgl. Abbildung 4.31). Weisen OSB-03 und SWP-3F im Mittel leicht verringerte Werte der Bruchkraft auf, ist bei PLY-BB vor allem der Effekt der Verringerung der Streubreite und eine im Mittel leicht gestiegene Bruchkraft zu verzeichnen. In beiden Fällen der Warmlagerung (r1 und r2, vgl. Tabelle 3.8, S. 102) sind diese Veränderungen gegenüber den im Normklima konditionierten Proben vergleichbar.

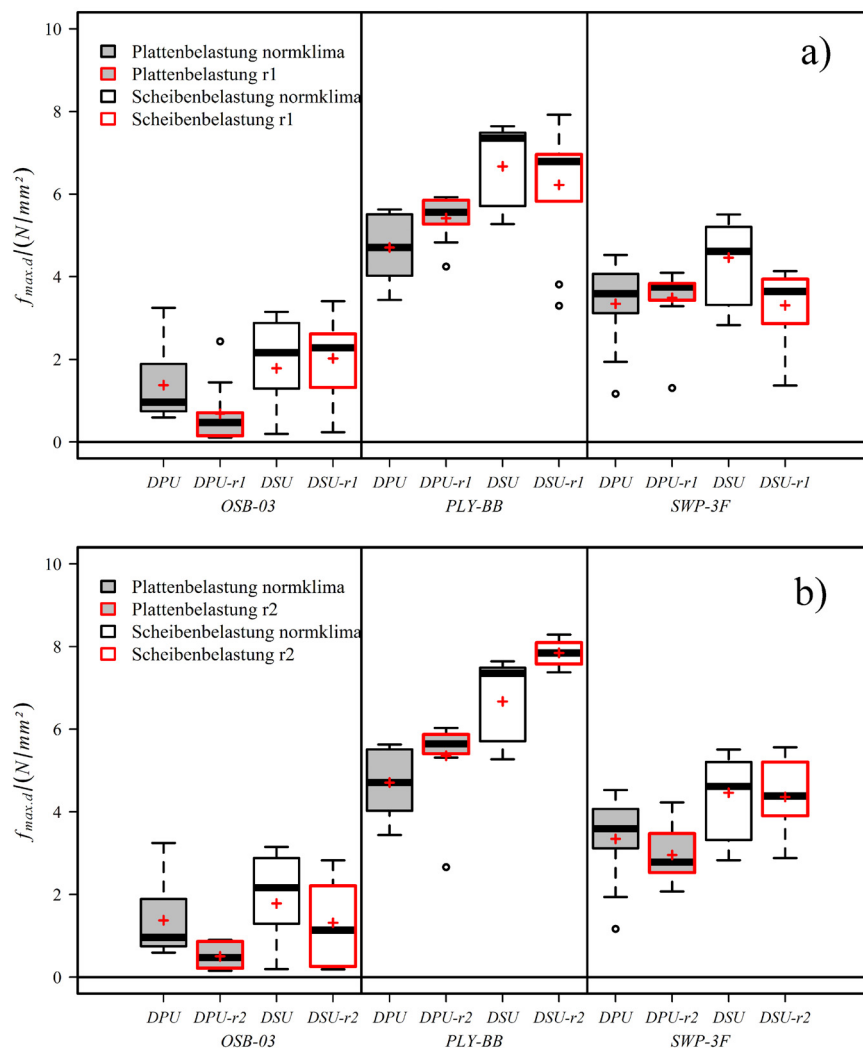


Abbildung 4.31: Bruchkraft bezogen auf die Querschnittfläche, thermische Schädigung mit Reklimation: a) Temperaturregime r1 (105 °C), b) Temperaturregime r2 (200 °C). Zahlenangaben siehe Anlage IV. Tabelle IV.2

Weiterhin zeigen die thermisch geschädigten Proben keinen einheitlichen Trend zur Veränderung der Brucharbeit (vgl. Abbildung 4.32). Steigt die Brucharbeit für PLY-BB-DPU im Mittel leicht an, reduziert sie sich bei SWP-3F-DSU. Wiederum sind die Ergebnisse aber zwischen Konditionierung r1 und r2 vergleichbar. Da die Effektgröße keine sicheren Aussagen zulässt, muss davon ausgegangen werden, dass es sich um Variationen des Werkstoffs (vor allem

bei SWP-3F) handelt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass: i) keine Veränderungen der Bruchlänge und ii) eine leichte Reduktion der Bruchkraft im Mittel bei OSB-03 und SWP-3F bei Plattenbelastung und iii) keine wesentliche Reduktion der Brucharbeit mit der thermischen Schädigung einhergehen.

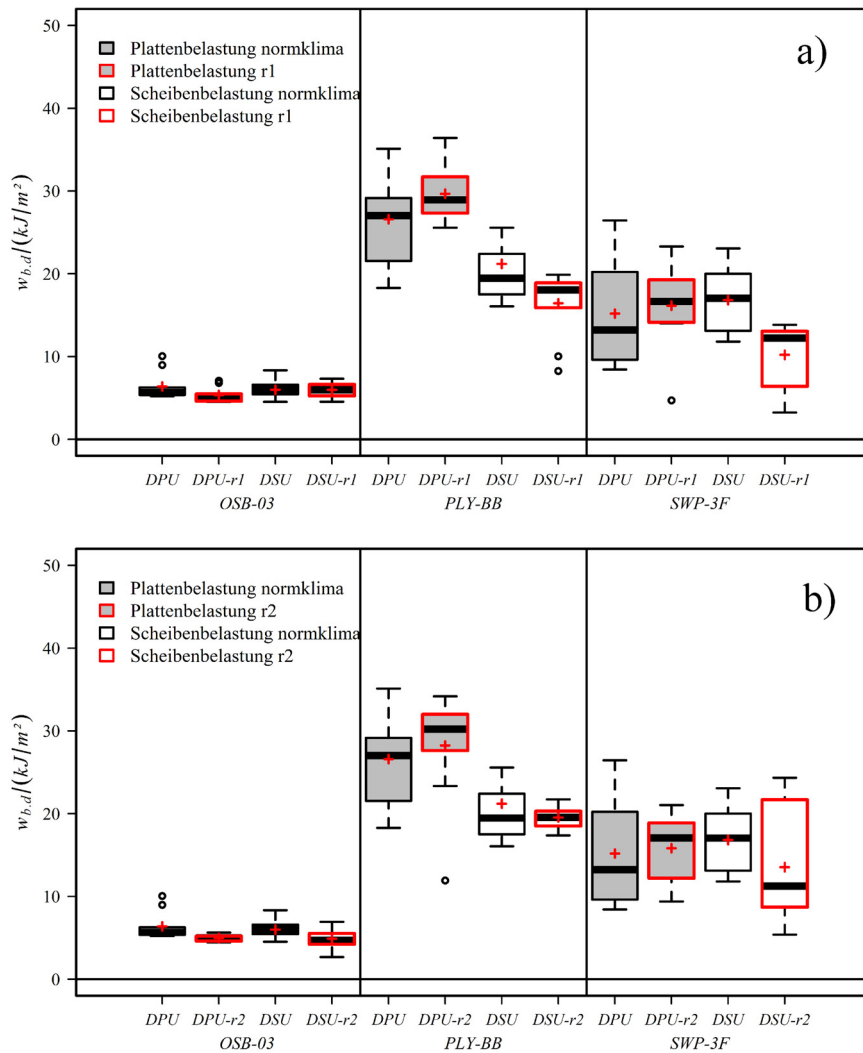


Abbildung 4.32: Brucharbeit bezogen auf die Querschnittsfläche, thermische Schädigung mit Reklimation: a) Temperaturregime r1 (105 °C), b) Temperaturregime r2 (200 °C). Zahlenangaben siehe Anlage IV, Tabelle IV.3

4.5.2 Trockene Proben ohne Reklimation

Die Proben wurden abweichend von der in Kapitel 3.1.1, S. 63 beschriebenen Temperatur und Luftfeuchtigkeit klimatisiert. Bei einer Temperatur von 105 °C wurden diese bis zum darrtrockenen Zustand getrocknet und dann ohne Reklimation auf Normklima (Temperaturregime r3) im Schlagversuch geprüft. Dies machte sich aus den Gründen, die in Kapitel 4.2.2, S. 114 beschrieben sind erforderlich. Bezüglich der bezogenen Bruchlänge lässt sich eine minimale mittlere Zunahme feststellen (vgl. Abbildung 4.33), die aber nur für PLY-BB-DSU-r3 und

SWP-3F-DPU-r3 eine relevante Effektgröße erreicht. Warum dieser Effekt nicht einheitlich für alle Werkstoffe auftritt kann nicht geklärt werden. Vermutlich ist die Inhomogenität der Werkstoffe ursächlich für die genannten Effekt der beiden Fälle.

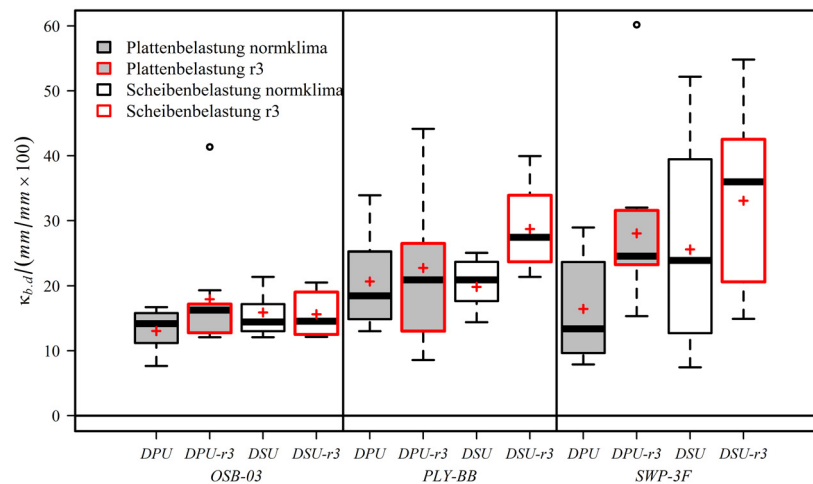


Abbildung 4.33: Bruchlänge bezogen auf die Probenlänge, trockene Proben ohne Reklimateisierung: Temperaturregime r3. Zahlenangaben siehe Anlage V, Tabelle V.1

Die Veränderung der bezogenen Bruchkraft (vgl. Abbildung 4.34) gegenüber dem Normklima ist ähnlich dem Verhalten bei Temperaturregime r2 (vgl. Abbildung 4.31b, S. 145). Es zeigt sich eine im Mittel leichte Erhöhung der Werte für PLY-BB. Ebenso eine Reduzierung der Streubreiten. OSB-03-DPU-r3 und SWP-3F-DPU-r3 gehen in den Werten der Bruchkraft zurück gegenüber dem Normklima. Vermutet werden kann an dieser Stelle eine thermische Schädigung des Klebstoffs (OSB → PMDI und SWP → MUPF, vgl. Kapitel 2.3.2, S. 32 und Tabelle 3.3, S. 72).

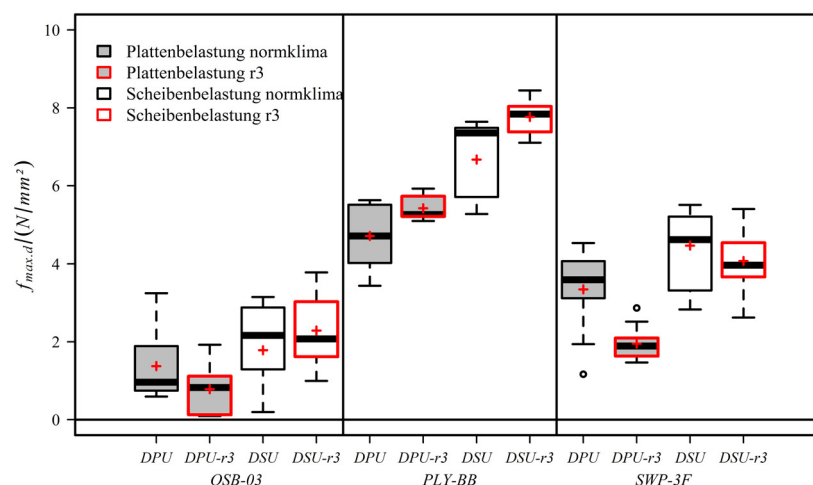


Abbildung 4.34: Bruchkraft bezogen auf die Querschnittfläche, trockene Proben ohne Reklimateisierung: Temperaturregime r3. Zahlenangaben siehe Anlage V, Tabelle V.2

Hinsichtlich der bezogenen Brucharbeit im Temperaturregime r3 (vgl. Abbildung 4.35) lässt sich wiederum ein vergleichbares Verhalten wie bei Temperaturregime r1 und r2 feststellen (vgl. Abbildung 4.32, S. 146). Dies besteht im wesentlichen in gleichbleibender Brucharbeit bei OSB-03 und SWP-3F und einer leichten Erhöhung im Mittel der Werte bei PLY-BB. Auch hier sind aufgrund der Streubreiten nur schwer relevante Effektgrößen auszumachen.

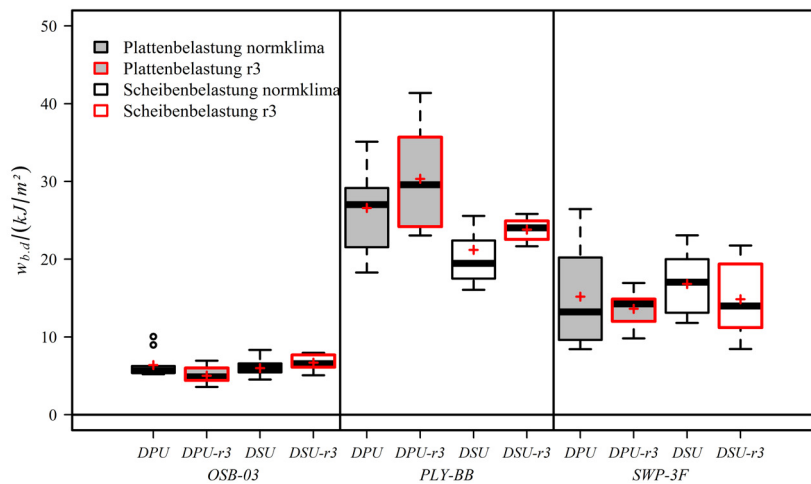


Abbildung 4.35: Brucharbeit bezogen auf die Querschnittfläche, trockene Proben ohne Reklimateisierung: Temperaturregime r3. Zahlenangaben siehe Anlage V, Tabelle V.3

4.5.3 Kerbwirkung im Normklima

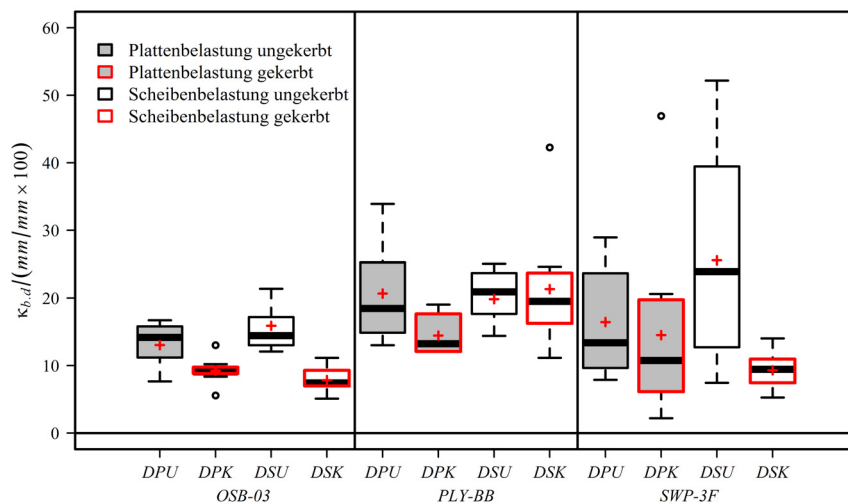


Abbildung 4.36: Auf den Widerlagerabstand bezogene Bruchlänge. Zahlenangaben siehe Anlage VI, Tabelle VI.1

Es zeigt sich im Mittel eine schwache, mit der Einkerbung (vgl. Kapitel 3.2.3, S. 74) einhergehende, Reduzierung der Bruchlängen (vgl. Abbildung 4.36). Eine relevante Effektgröße kann jedoch nur für OSB-03 und SWP-3F bei Scheibenbelastung angenommen werden. Eine Reduzierung der Bruchlänge bei Reduzierung des Querschnittes erscheint aber dahingehend plausibel, da für die gekerbten Proben in dem Maß weniger Brucharbeit aufgewendet werden muss, wie sich deren Querschnitt verringert. Dies lässt sich aus Abbildung 4.39 schließen. Hier liegen die bezogenen (Vollquerschnitt) Brucharbeiten der ungekerbten Proben in etwa auf dem gleichen Niveau wie die bezogenen (Restquerschnitt) Brucharbeiten der gekerbten Proben.

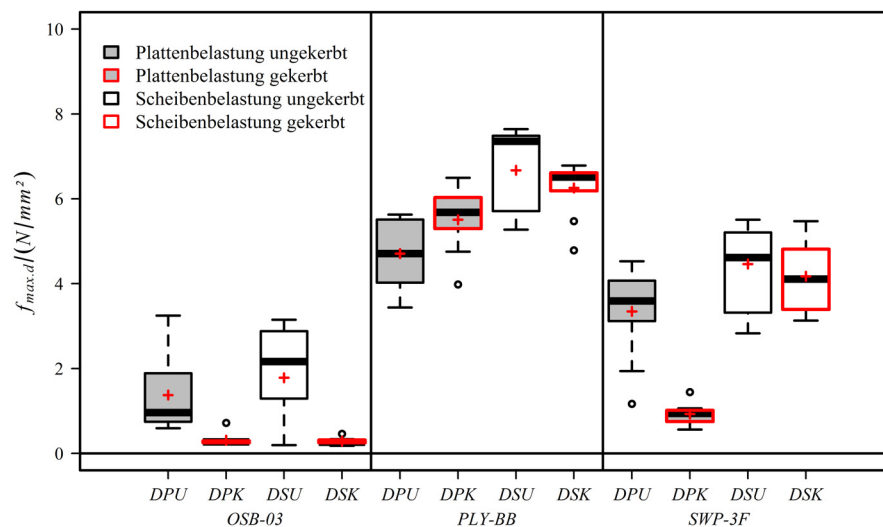


Abbildung 4.37: Auf den gekerbten Probenquerschnitt bezogene Bruchkraft. Zahlenangaben zur Statistik siehe Anlage VI, Tabelle VI.2

In Bezug auf die Bruchkraft bei gekerbten Proben zeigen sich deutliche Effekte bei OSB-03 und SWP-3F bei Plattenbelastung. Die starke Reduzierung der Bruchkraft (vgl. Abbildung 4.37) wie auch der Brucharbeit (vgl. Abbildung 4.39) bei SWP-3F-DPU erklärt sich eindeutig durch die vollständige Trennung der auf Zug belasteten Decklage infolge der Einkerbung. Bei OSB-03 brechen die Werte der bezogenen Bruchkraft völlig ein. Wohingegen sich die bezogene Brucharbeit nahezu unverändert im Vergleich zur ungekerbten Probe zeigt. Dies wirkt zunächst widersprüchlich, erklärt sich aber beim Blick auf die erhaltenen Kraft-Durchbiegungs-Kurven des Schlagversuches (vgl. Abbildung 4.38). Bereits bei den ungekerbten Proben aus OSB-03 ist das Trägheitsmaximum vom Maximalwert der Kraft höher als die Bruchkraft. Auch die in diesem Bereich aufgenommene Arbeit bestimmt die Gesamtbrucharbeit wesentlich. Hinzu kommt noch die im Restbruchbereich aufgenommene Arbeit. Die Veränderung der reduzierten Bruchkraft wirkt sich so nur marginal auf die gesamte beim Bruch aufgenommene Arbeit aus.

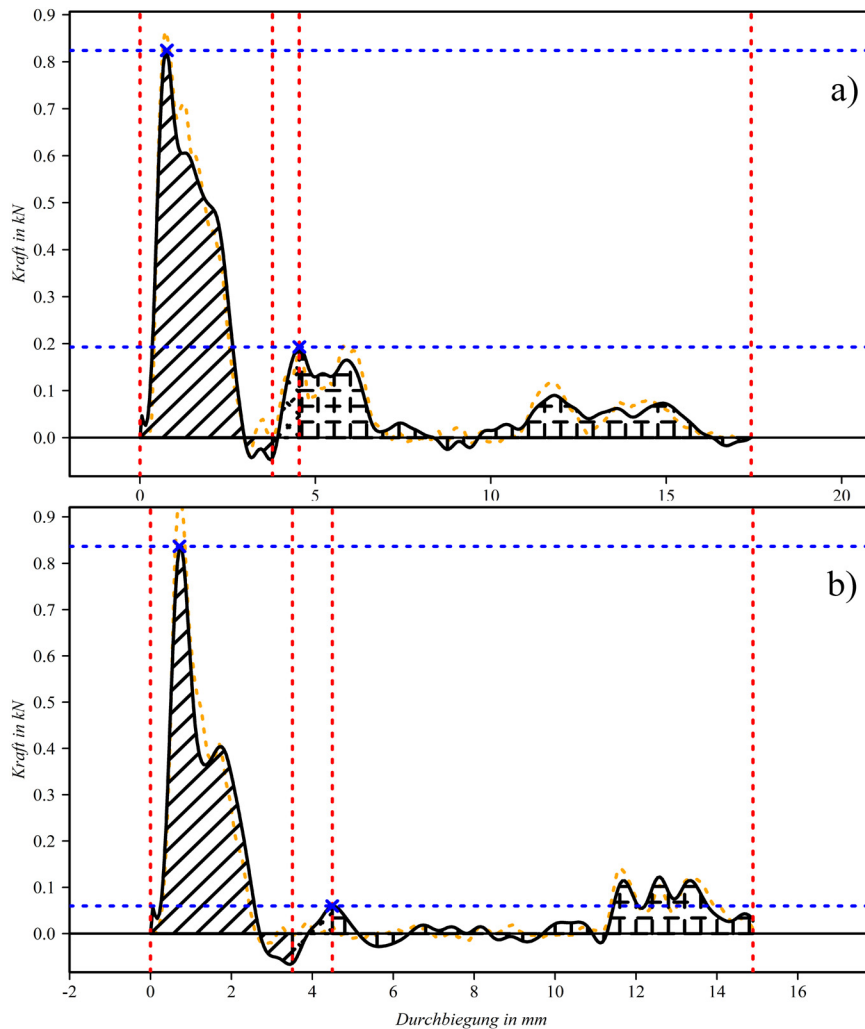


Abbildung 4.38: Beispiel einer Kraft-Verformungs-Kurve für OSB-03 bei Plattenbelastung a) ungekerbt b) gekerbt

An dieser Stelle wird erneut deutlich, dass beide Kennwerte (Brucharbeit und Bruchkraft) nur gemeinsam betrachtet eine Einschätzung des Werkstoffes erlauben. Ebenso wird deutlich, dass der Werkstoff OSB-03 zunächst Kräfte des Trägheitsmaximums im Bereich um 1 kN am Messsystem auslöst, wohingegen er nachfolgend bei kleineren Kräften bricht. Dieses Verhalten zeigt, dass der Werkstoff im Grunde nicht für die Prüfung mit dem in dieser Arbeit verwendeten Pendel mit 129 J Nennarbeitsvermögen geeignet ist. Es müsste ein kleineres Pendelschlagwerk genutzt werden, welches massenmäßig auf die niedrige Festigkeit von OSB abgestimmt ist. Zusammenfassend kann eine nur geringe Kerbempfindlichkeit der geprüften Werkstoffe gegenüber der verwendeten Kerbgeometrie beobachtet werden. Diese richtet sich nach Plattenaufbau und Belastungsrichtung. Abschließend sei noch ein weiterer Effekt bemerkt. PLY-BB-DPU-nk zeigt als einzige Prüfcharge bei thermischer Schädigung (vgl. Abbildung 4.32a und b, S. 146 und Abbildung 4.35, S. 148) sowie auch bei Einkerbung (vgl. Abbildung 4.39) eine leicht höhere Brucharbeit als im ungekerbten normklimatisierten Zustand. Dies deutet darauf hin, dass vermutlich eine ungünstige Stichprobenauswahl bei der Wahl der 10 Proben der Charge PLY-BB-DPU-nk getroffen wurde. Da die Proben nicht bezüglich ihrer Entnahmestelle

aus der Platte randomisiert wurden, besteht die Möglichkeit, dass einige Proben der Charge aus einem Bereich lokaler niedriger Qualität der Platten, verursacht durch Furnierüberlappungen o. ä., entnommen wurden. Dieser Umstand kann erklären, dass die Werte der im Normklima konditionierten Proben niedriger ausfallen als die der thermisch und durch Kerben geschwächten Proben.

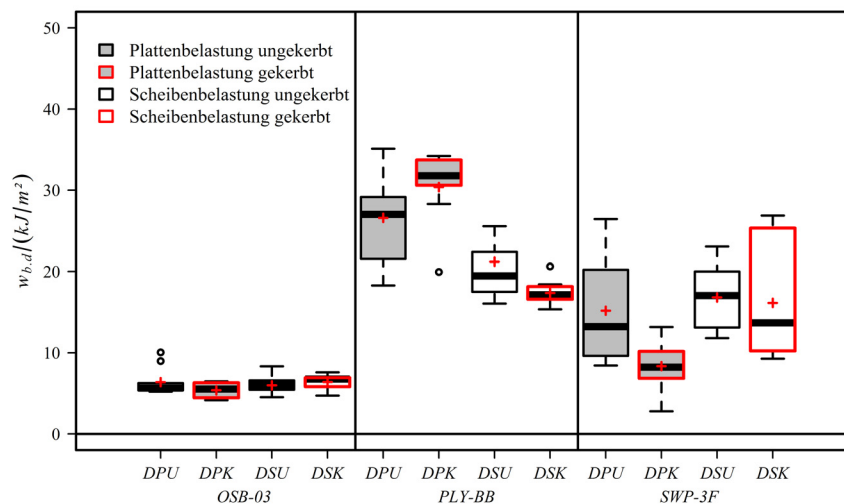


Abbildung 4.39: Auf den Restquerschnitt bezogene Brucharbeit. Zahlenangaben siehe Anlage VI, Tabelle VI.3

4.6 Bewertung der Stichprobengröße

Nach erfolgter Prüfung der jeweiligen Charge (vgl. Tabelle 3.8, S. 102) wurde das in Kapitel 3.8, S. 103 ff. beschriebene Verfahren zur Prüfung der Homogenität der Stichprobe angewendet. Es wurden in 1e4 Bootstrap-Iteration jeweils $n = 9$ Kurven zufällig durch Ziehen mit Zurücklegen aus den $N = 10$ gemessenen Kurven einer Charge ausgewählt und der Anteil der Fläche der Kontrollkurve außerhalb des 95 %-Konfidenzbandes $P_{n,z=1,96}$ bestimmt (vgl. Abbildung 4.40). Die Verteilung der Werte von $P_{n,z}$ der 1e4 Iterationen (ermittelt für $n = 2, 3 \dots 9$ und $z = 1,96$) zeigte für jede Prüfcharge der Querschnitt- und Längsschnittmessreihen einen konvergenten Verlauf (vgl. Abbildung 4.41). Es wurde erwartet, dass: i) in jedem Fall ein konvergenter Verlauf von $P_{n,z}$ mit größer werdendem n und ii) die Werte bei $n = 9$ und $z = 1,96$ in einem Bereich von $P_{n,z} = 0,05$ liegen. Größere Abweichungen wurden nicht erwartet. Treffen diese Erwartungen für jede Prüfcharge ein, kann davon ausgegangen werden, dass mit weiteren Messungen keine wesentlich verschiedene neue Charakteristik der Kurven mehr hinzukommt. Somit ist die Stichprobe ausreichend groß, um die zugrundeliegende theoretische Vielfalt an möglichen Kurvenverläufen (einer Charge des gleichen Werkstoffs bei gleicher Belastung und Klimatisierung) zu charakterisieren.

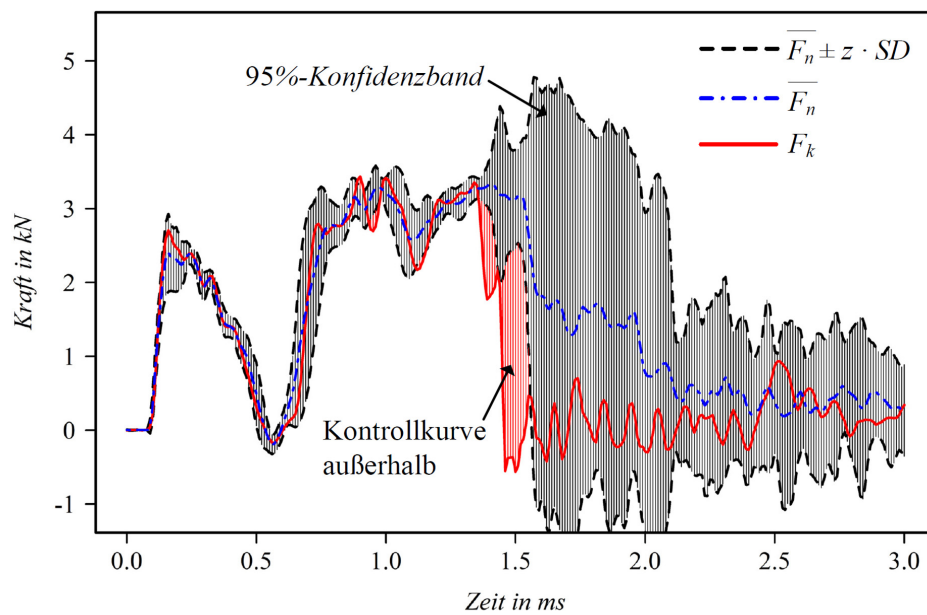


Abbildung 4.40: Beispiel eines Konfidenzbandes für Schlagbiegeversuche in Plattenrichtung, Werkstoff PLY-KQ, $n = 9$ zufällig mit Zurücklegen aus $N = 10$ ausgewählten Messungen, deren 95 % - Konfidenzband, Mittelwerte und zufällig ausgewählte Vergleichskurve.

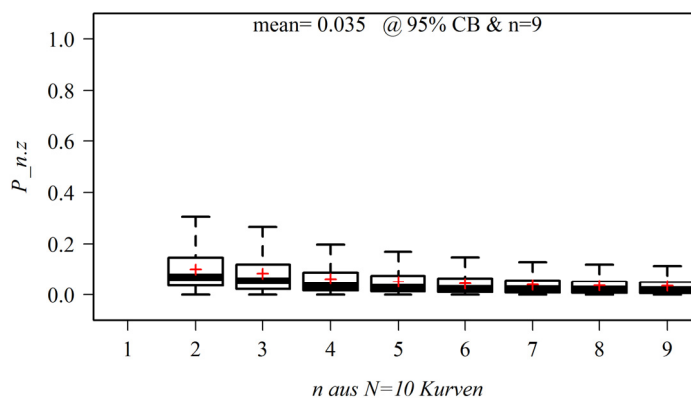


Abbildung 4.41: Konvergenter Verlauf von $P_{n,z}$ mit größer werdendem n , für das Prüflös PLY-KQ-DPU-nk (auf die Darstellung der Ausreißer wird aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet)

Liegen die Werte für $P_{n,z}$ zwischen den verschiedenen Chargen in einem vergleichbaren Bereich, ist auch deren Aussagegehalt gegenüber der zugrundeliegenden Vielfalt der Kurvenausprägung vergleichbar. Große Unterschiede zwischen verschiedenen Prüfchargen einer Messreihe oder zwischen Prüfchargen verschiedener Messreihen stellen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Frage. Es zeigt sich, dass mit der angenommenen Stichprobengröße von $N = 10$ ein Konvergenzniveau von $P_{n,z} < 0,05$ von der überwiegenden Mehrzahl der Prüfchargen erreicht wird (vgl. Abbildung 4.42). Der Vergleich der aus den Stichproben gewonnenen charakteristischen Größen kann ohne Verzerrungen infolge der Stichprobengröße stattfinden.

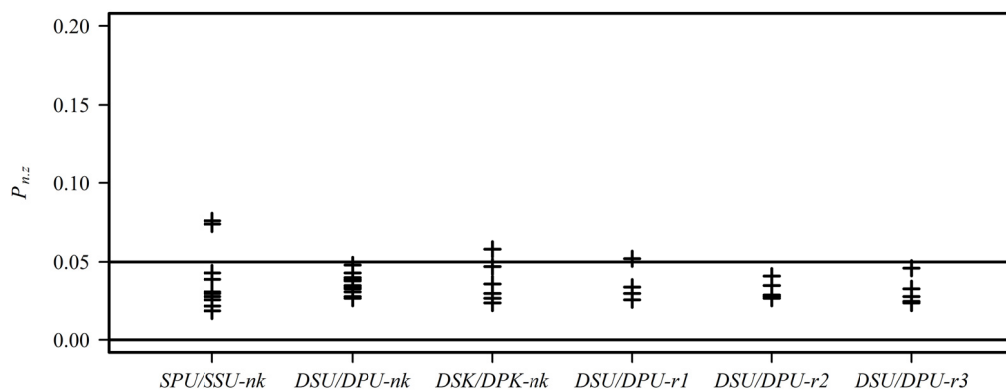


Abbildung 4.42: Konvergenzniveau der Prüfchargen, Mittelwerte von $P_{n,z}$ mit $n = 9$ und $z = 1,96$ für alle Prüfchargen der einzelnen Messreihen

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Quer- und Längsschnitt

Es wurden an sieben sich teilweise in Holzart, Klebstoff, Lagenaufbau und -anzahl unterscheidenden Holzwerkstoffen statische Biegeversuche und Schlagbiegeversuche durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2, S. 111). Es war möglich charakteristische Kraft-Verformungs-Verläufe für die Werkstoffe aufzuzeichnen. Aus diesen wurden Kennwerte (bezogene Größen) berechnet, anhand derer Unterschiede im Bruchverhalten beschrieben werden konnten (vgl. Kapitel 4.3, S. 116). Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Werkstoffen und Belastungsrichtungen (vgl. Kapitel 4.4.1, S. 126 und Kapitel 4.4.2, S. 132). Weiterhin wurden Parallelen zwischen statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.4.3, S. 136). Auch zeigten sich werkstoffübergreifend Abhängigkeiten der mechanischen Kennwerte von der Dichte (vgl. Kapitel 4.4.4, S. 139). Bei der Untersuchung thermisch geschädigter Proben konnten nur geringe Auswirkungen auf die Kennwerte des Schlagbiegeversuches festgestellt werden (vgl. Kapitel 4.5.1, S. 144 und Kapitel 4.5.2, S. 146). Gleiches gilt für die Kerbempfindlichkeit Kapitel 4.5.3, S. 148. In Bezug auf die thermisch geschädigten Proben kann aber festgestellt werden, dass jeweils ein leicht abweichendes Verhalten von OSB und SWP gegenüber PLY auftrat. Als Ursache werden die Klebstoffe der Holzwerkstoffe in Betracht gezogen. Die Stichprobengröße von $N = 10$ konnte in der überwiegenden Mehrzahl der Prüflose als ausreichend groß bezeichnet werden (vgl. Kapitel 4.6, S. 151).

4.8 Entwicklung eines Systems von Fähigkeitsklassen

4.8.1 Anforderungen

Entsprechend der Aufgabenstellung ist ein Modell zur Klassifizierung der Werkstoffe zur Werkstoffauswahl für sicherheitsrelevante Bauteile abzuleiten. Als sicherheitsrelevante Bauteile gelten im Sinne dieser Arbeit solche, die den in Kapitel 1.2, S. 21 beispielhaft skizzierten Szenarien unterliegen. In diesen treten schlagartige Belastungen infolge ungeplanter Änderungen des Bewegungszustands auf. Ohne Frage sind für sicherheitsrelevante Bauteile weitere Szenarien denkbar, die z. B. Dauerfestigkeit und Ermüdung, Reibverschleiß etc. berücksichtigen. Diese sind jedoch nicht Teil dieser Arbeit. Ein Werkstoff kann dann als geeignet für die beschriebenen Szenarien angesehen werden, wenn er große Belastungen bei hoher Belastungsgeschwindigkeit aufnehmen kann ohne zu versagen. Belastungen sind am Bauteil angreifende Kräfte und Verformungen infolge der Kollision mit einer weiteren bewegten Masse. Einwirkende Kraft und resultierende Verformung ergeben kumuliert die vom Bauteil aufgenommene Arbeit. Es wird deutlich, dass die Betrachtung der aufgenommenen Energie, isolierte von Kräften oder Verformungen, keine Aussage darüber zulässt wie fähig ein Werkstoff (eines Bauteils) ist, diesen Belastungen stand zu halten und somit seine Sicherheitsfunktion zu erfüllen. Nur eine **integrale Berücksichtigung von Kräften, Verformungen und aufgenommener Energie** in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit bietet die Möglichkeit geeignete von ungeeigneten Werkstoffen zu unterscheiden. Von besonderer Wichtigkeit ist hier der einfache und überblicksmäßige Vergleich zwischen zwei oder mehreren Werkstoffen. Auf diese Weise können neue Werkstoffe (der Markt an Holzwerkstoffen ergänzt sich kontinuierlich an spezifischen Produkten) bekannten Werkstoffen gegenübergestellt und deren **Eigenschaftsprofile** verglichen werden. So kann eine Datensammlung über die mechanische Fähigkeit der Werkstoffe entstehen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die in dieser Arbeit im Schlagversuch ermittelten Kennwerte bzw. charakteristischen Werte bezogener Größen nicht zur Dimensionierung, sondern nur zur Werkstoffauswahl genutzt werden können und dürfen⁵⁷. Das Ziel der **Klassenbildung** ist die algorithmische Überführung bestimmter rational-skalierten Objekteigenschaften (physikalisch-mechanische Kennwerte wie Bruchspannung oder E-Modul) in (ordinal-skalierte) Kategorien. Diese Kategorien (Klassenwerte) ermöglichen eine leichtere Vergleichbarkeit der Werkstoffprofile. Auch ist angestrebt, dass aus den Kategorien wieder Mindestwerte der Eigenschaften für den konkreten Werkstoff abgeleitet werden können. Weiterhin soll das Modell zur Klassenbildung möglichst offen sein, um beliebige Eigenschaftskombinationen abbilden zu können. Dies muss bei der Definition der Ober- und Untergrenzen des Gültigkeitsbereichs des Modells berücksichtigt werden. Beispiele für eine entsprechende Klassifizierung der Eigenschaften von Holzwerkstoffen nach Kennwerten aus dem Biegeversuch sind in [Apitz 1986] besonders aber in [DIN EN 636] vorhanden. Eine Klassifizierung nach abstrahierten Kategorien wie Anwendungsbereich oder

⁵⁷ Für die Dimensionierung sind charakteristische Werte nach [DIN EN 12369-1] bis [DIN EN 12369-3] zu nutzen.

Herstellungsverfahren (vgl. Abbildung 2.4, S. 28) ist für einen quantitativen Vergleich der Fähigkeiten einzelner Werkstoffe ungeeignet. Zum einen kann die Zuordnung der **Fähigkeitsklassen** nicht algorithmisch erfolgen. Zum anderen ist die Rückführbarkeit auf konkrete Mindestwerte der Werkstoffe in den verschiedenen Fähigkeitsklassen nur bedingt möglich. Folgende Anforderungen an das System von Fähigkeitsklassen werden gestellt: i) ein möglichst **großer Modellrahmen** der das Modell für eine ganze Bandbreite von Werkstoffen öffnet, ii) die algorithmische Zuordnung charakteristischer Werte der Werkstoffe zu den Mindestanforderungen der Klassen, iii) die Zuordnung von Mindestanforderungen der Klassen zu den Werkstoffen, iv) eine übersichtliche Vergleichsmöglichkeit zwischen den Werkstoffen und v) die integrale Berücksichtigung bezogener Größen der Festigkeit, Steifigkeit und Energieaufnahme.

4.8.2 Vorschlag für ein System von Fähigkeitsklassen

Für Holzwerkstoffe existiert eine Reihe von Klasseneinteilungen nach verschiedenen Eigenschaften (vgl. Tabelle 2.4, S. 41). Für Sperrholz sind Klassen der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls angegeben (vgl. [DIN EN 636]). Die Zuordnung eines Werkstoffes erfolgt anhand von Grenzwerten der aus statischen Versuchen gewonnenen diskreten Kennwertverteilungen (5 % - Quantile). Charakteristische Werte der Brucharbeit (statisch oder dynamisch) hingegen werden in der Normung für Holzwerkstoffe nicht angegeben. Aus Sicht des Autors bedarf es hier der Ergänzung dieser Angaben. Es ist möglich für jeden Werkstoff die Brucharbeit bei statischer und schlagartiger Belastung anzugeben. Zur Ermittlung der statischen Brucharbeit kann der Biegeversuch nach [DIN EN 310] mit der in dieser Arbeit veränderten Spezifikation (vgl. Kapitel 3.5, S. 78) Anwendung finden. Es ist lediglich notwendig, die Prüfroutine dahingehend zu ergänzen, dass i) das Flächenintegral unter der Kraft-Verformungs-Kurve bestimmt wird, ii) die Proben einen quadratischen Querschnitt aufweisen und die Probenhöhe im Verhältnis 1/12 zum Widerlagerabstand steht und iii) der Prüfvorgang möglichst bis zur vollständigen Trennung der Probe fortgeführt wird. Letzteres ergibt sich aus der Notwendigkeit auch das Restbruchgeschehen mit aufzuzeichnen. Dieses bedingt wesentlich die Gesamtbrucharbeit. Für die Ermittlung der Brucharbeit bei schlagartiger Belastung kann ein nicht instrumentiertes Schlagpendel nach [DIN 52189] genutzt werden. Nur die kombinierte Nennung von Steifigkeit und Festigkeit eines Werkstoffes mit dessen Arbeitsaufnahme im statischen und dynamischen Fall ist dazu geeignet, die Leistungsfähigkeit und daraus abgeleitet auch die Einsatzfähigkeit für sicherheitsrelevante Bauteile zu beurteilen. Diese Annahme liegt darin begründet, dass i) in den gängigen Klassen nur das Verhalten bis zum Bruch, nicht aber das Restbruchverhalten berücksichtigt wird, ii) die Festigkeit und der Elastizitätsmodul keine Aussage zur Zähigkeit der Werkstoffe, bzw. zur Energieaufnahmefähigkeit ermöglichen, und iii) nur so ggf. kritische Veränderungen der Arbeitsaufnahme zwischen statischer und schlagartiger Belastung erkennbar werden. Die Normung unterscheidet die Werkstoffklassen jeweils innerhalb einer Werkstoffgruppe nach verschiedenen Kategorien (vgl. Tabelle 2.4, S. 41). Erstrebenswert für die Nutzung von

Holzwerkstoffen in technischen Bauteilen ist hingegen eine, die Werkstoffgruppen (PLY, OSB, SWP, LVL etc.) übergreifende Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Werkstoffes. Deutlich wird dies bei dem in der Arbeit untersuchten Werkstoff PLY-KQ. Dieser ist aufgrund seiner Lagenorientierung kein Sperrholz (vgl. Tabelle 3.3, S. 72). Sobald seine Mittellage um 90 ° gedreht angeordnet wäre, würde sich die Zuordnung ändern. Es wird deutlich, dass die geringste Veränderung am Plattenaufbau, die sich nur untergeordnet in den mechanischen Eigenschaften widerspiegelt, ggf. eine Zuordnung zur entsprechenden Norm (am Beispiel PLY-KQ zur [DIN EN 636]) unmöglich macht. Wie bereits aus der Werkstoffbezeichnung in der Arbeit deutlich wird, wurde gerade dieser Werkstoff dennoch der Gruppe der Sperrhölzer (PLY) zugeordnet (eigentlich LVL). Es ist notwendig die Klassifizierung der Werkstoffe über die Werkstoffgruppen hinweg vorzunehmen, gerade um auch zwischen diesen vergleichen zu können. Die Prüfung der Biegeeigenschaften bei verschiedenen Werkstoffgruppen (z. B. LVL, OSB und PLY) erfolgt ohnehin nach der gleichen Norm ([DIN EN 310]). Es sind geeignete Merkmale auszuwählen, die eine integrale Beurteilung der Fähigkeiten der Werkstoffe zulassen. So werden die Biegefestigkeit (bezogene Bruchkraft), die Biegesteifigkeit (der E-Modul), die Brucharbeit im statischen Biegeversuch und die Brucharbeit im Schlagbiegeversuch gewählt. Für die vorgeschlagene Klassifizierung ist es folgend notwendig diese Merkmale der jeweiligen Werkstoffe in verschiedene Klassen einzuordnen. Das Vorgehen dazu orientiert sich an [DIN EN 636]. Aus der Lage und Verteilung der im statischen Versuch ermittelten bezogenen Größen $f_{max,s}$, $E_{p,s}$ und $w_{B,s}$ (vgl. Kapitel 4.3.1, Tabelle 4.5, S. 120 und Abbildung 4.12, S. 127, Abbildung 4.14, S. 129, Abbildung 4.27, S. 142, Abbildung 4.19, S. 134) werden zunächst charakteristische Größen gebildet. Im Einklang mit oben genannter Norm wird als charakterischer Wert einer bezogenen Größe das 5 % - Quantil der Messreihe berechnet (vgl. Kapitel 3.9, S. 108). Diese Werte sind im Folgenden gekennzeichnet als $f_{max,s5}$, $E_{p,s5}$ und $w_{B,s5}$. Ebenso wird das 5 % - Quantil der Bruchslagarbeit $w_{B,d5}$ berechnet. Die Berechnung der Quantile als statistische Lagemaße berücksichtigt dabei die Verteilung der bezogenen Größen ebenso wie deren Magnitudenausprägung. Die Wahl des 5 % - Quantils führt zu einer sicheren weil konservativen Einschätzung der erreichten Werte der bezogenen Größen. Somit liegen die werkstoffseitigen charakteristischen Klasseneigenschaften kc_{1-4} als Eingangsgrößen für das Klassenmodell vor (vgl. Gleichung 4.18).

$$f_{max,s5} = kc_1 ; E_{p,s5} = kc_2 ; w_{B,s5} = kc_3 ; w_{B,d5} = kc_4 \quad \text{Gleichung 4.18}$$

Folgend sind die Bereiche der Werteausprägung festzulegen, in dem die kc_{1-4} liegen dürfen, um in das Modell eingeordnet werden zu können. Es ist vorteilhaft die unteren Grenzwerte $kc_{i,l} = \text{NULL}$ zu verwenden. So werden keine Mindestanforderungen gestellt, die ein Werkstoff erfüllen muss (vgl. Gleichung 4.19).

$$kc_{i,l} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad \text{Gleichung 4.19}$$

Hingegen ist die Wahl der Obergrenzen $kc_{i,h}$ für die Eigenschaften nicht in einem Satz zu beantworten. Werden diese zu hoch angesetzt, reduziert sich bei einer festen Klassenzahl die Auflösung des Modells. Die Werkstoffe können so nicht ausreichend differenziert werden. Werden die Obergrenzen zu niedrig angesetzt, ist das Modell hin zu leistungsfähigen Werkstoffen beschränkt. Weiterhin muss bei der Wahl der Obergrenzen auch eine Schiefe des Modells vermieden werden. Diese kann entstehen wenn die Obergrenzen im Verhältnis zueinander verschieden hoch angesetzt werden. Die Auswahl der Obergrenzen kann dennoch nur subjektiv geschehen. Auch in [DIN EN 636] sind die Obergrenzen der Mindestanforderungen der 5 %- Quantile für die Sperrholzklassen basierend auf Erfahrungen festgelegt (120 N/mm² Biegefestigkeit der Klasse F 80 und 12.600 N/mm² Biege-Elastizitätsmodul der Klasse E 140). Die Grenzen des Klassenmodells werden etwas weiter gefasst, als die in [DIN EN 636] für die höchsten Klassen der Festigkeit und Steifigkeit angegebenen. Damit kann das Klassenmodell auch auf verdichtete Kunstharzpresshölzern angewendet werden. Deren Werte⁵⁸ liegen noch über den Obergrenzen aus [DIN EN 636]. Gleichzeitig markieren diese verdichteten Werkstoffe eine Grenze dessen, was mit Holzwerkstoffen an mechanischer Leistungsfähigkeit erreicht werden kann. Die Obergrenzen $kc_{1,h}$ und $kc_{2,h}$ sind entsprechend Gleichung 4.20 definiert. Da die Obergrenze für $kc_{1,h}$ mit 200 N/mm² als maximale Randfaserspannung angegeben ist (vgl. Gleichung 4.4), muss diese, in die auf die Querschnittfläche bezogene Bruchkraft (vgl. Gleichung 4.3), umgerechnet werden⁵⁹.

$$kc_{1,h} = \frac{200}{18} \frac{N}{mm^2}, \quad kc_{2,h} = 20 \frac{kN}{mm^2}, \quad kc_{3,h} = 100 \frac{kJ}{m^2}, \quad kc_{4,h} = 70 \frac{kJ}{m^2} \quad \text{Gleichung 4.20}$$

Die Obergrenzen $kc_{3,h}$ und $kc_{4,h}$ für die statische und schlagartige Brucharbeit werden aus den gemessenen Werten abgeschätzt. Die Berechnung der statischen Brucharbeit und somit der charakteristischen Werte für das Klassenmodell, konnte aus früheren Messungen an Kunstharzpressholz der Dichte 1,4 g/cm³ nicht durchgeführt werden. Die früheren Versuche wurden nur bis zur Bruchkraft aufgezeichnet, infolge dessen die Restbrucharbeit nicht bestimmt werden kann. So wird für die Obergrenze $kc_{3,h}$ der statischen Brucharbeit 100 kJ/m² angenommen. Die Obergrenze $kc_{4,h}$ der Brucharbeit im Schlagversuch wird im Verhältnis zu $kc_{3,h}$ festgelegt. Das Verhältnis von $kc_{3,h}$ zu $kc_{4,h}$ von 1 zu 0,7 resultiert aus der linearen Regression zwischen statischer Brucharbeit und Schlagbrucharbeit (vgl. Abbildung 4.22c, S. 138). Die Aufteilung der Klassen innerhalb der Definitionsgrenzen ($kc_{i,l}$, $kc_{i,h}$) erfolgt intervallskaliert, d. h. durch äquidistante Aufteilung. Die Klassenanzahl j_k wird in Anlehnung an [DIN EN 636] mit 12 festgelegt. So ergeben sich die Grenzen $kc_{i,j}$ der Klassen entsprechend Gleichung 4.21.

⁵⁸ In eigenen Messreihen des statischen Biegeversuchs zeigten sich bei Kunstharzpressholz einer Dichte von 1,4 g/cm³ mittlere Werte des Biege-Elastizitätsmoduls von 20 kN/mm² und der Biegefestigkeit von 200 N/mm².

⁵⁹ Bei konstanten Verhältnis von Probenhöhe zu Widerlagerabstand und quadratischem Querschnitt besteht ein konstantes Verhältnis von Randfaserspannung zu auf die Querschnittfläche bezogener Bruchkraft von 18 zu 1 (vgl. Gleichung 4.20).

$$kc_{i,j} = (kc_{i,h} - kc_{i,l}) / j ; j = 1, 2, \dots, j_k ; i = 1, 2, 3, 4 \quad \text{Gleichung 4.21}$$

Die Zuordnung zu den Klassen erfolgt abschließend über die Bedingung in Gleichung 4.22. Überschreitet der charakteristische Wert einer bezogenen Größe kc_i (vgl. Gleichung 4.18) den j -ten Grenzwert $kc_{i,j}$, wird dem Werkstoff diese **Fähigkeitsklasse** in der i -ten Eigenschaft zugeordnet.

$$kc_{i,j} \leq kc_i \quad \text{Gleichung 4.22}$$

Somit gibt die Klasse, in Zusammenhang mit den Obergrenzen und der Gesamtanzahl an Klassen, einen Mindestwert des 5 % - Quantils der bezogenen Größen von Festigkeit, Steifigkeit, statischer Brucharbeit und Schlagbrucharbeit des jeweiligen Werkstoffes an. Auf diese Art wird es möglich in komprimierter Form einen Überblick über die mechanische Leistungsfähigkeit des Werkstoffes zu erlangen. Die Änderung der Arbeitsaufnahme im statischen und schlagartigen Belastungsfall kann ebenso auf einen Blick charakterisiert werden. Und es werden Werkstoffgruppen übergreifende Vergleiche der mechanischen Leistungsfähigkeit möglich.

4.8.3 Klassenmodell angewendet auf die Querschnittmessreihe

Das im vorangehenden Kapitel beschriebene Klassenmodell wird nun auf die Ergebnisse der Querschnittmessreihe (vgl. Kapitel 4.4.1, S. 126 und 4.4.2, S. 132) angewendet. Die charakteristischen Werte entsprechend Gleichung 4.18 werden in die Klassen einsortiert. Eine Darstellung hierzu findet sich in Abbildung 4.43 bzw. in Abbildung 4.44. Zunächst finden sich die Steifigkeitsklassen kc_2 über den Festigkeitsklassen kc_1 des statischen Versuchs dargestellt. Es wird deutlich, dass sich diese unabhängig von Werkstoff und Belastungsrichtung (Scheiben- und Plattenbelastung, vgl. Abbildung 4.43) nahe um die 45°-Diagonale gruppieren. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Klasse der Bruchschlagarbeit kc_4 über der Klasse der Brucharbeit im statischen Versuch kc_3 in Abbildung 4.44. Auch hier ordnen sich die charakteristischen Werte der einzelnen Werkstoffe und Belastungsrichtungen, wenn auch nicht so streng, um die 45 °-Diagonale.

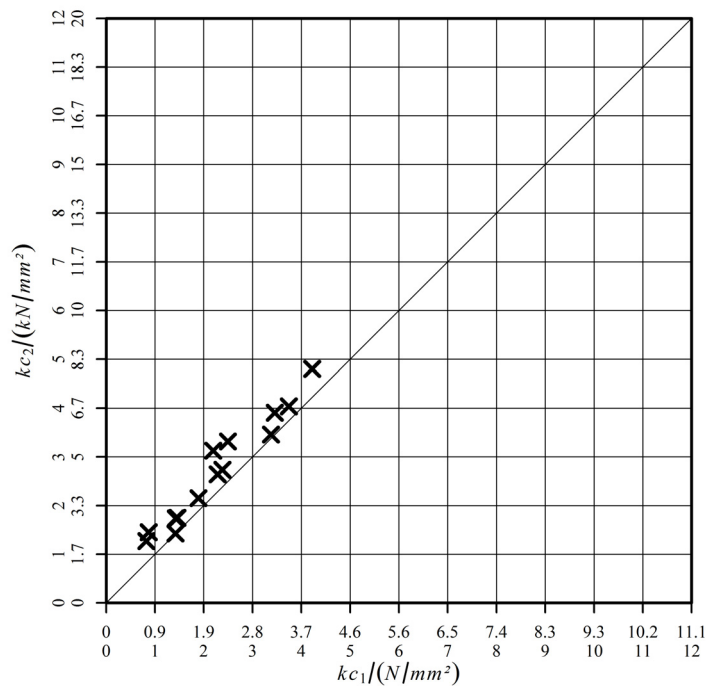


Abbildung 4.43: In das Klassenmodell eingetragene charakteristische Werte (5 %- Quantile) der Klasseigenschaften kc_2 (E-Modul) über kc_1 (auf die Querschnittfläche bezogene Bruchkraft). Achsenbeschriftung oben / innen Grenzwerte der charakteristischen Werte $kc_{1,j}$, $kc_{2,j}$, unten / außen Klasse (0-12).

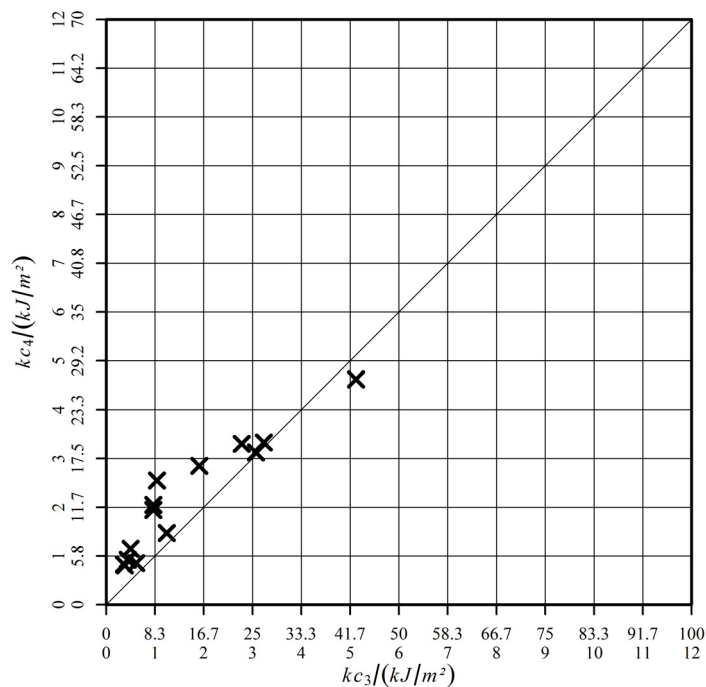


Abbildung 4.44: In das Klassenmodell eingetragene charakteristische Werte (5 %- Quantile) der Klasseigenschaften kc_4 (auf die Querschnittfläche bezogene Schlagburcharbeit) über kc_3 (auf die Querschnittfläche bezogene Brucharbeit im statischen Versuch). Achsenbeschriftung oben / innen Grenzwerte der charakteristischen Werte $kc_{3,j}$, $kc_{4,j}$, unten / außen Klasse (0-12).

Die Zuordnung der Grenzwerte der charakteristischen Werte kc_1 bis kc_4 zeigt für OSB-03 identische Fähigkeitsklassen bei Scheiben- und Plattenbelastung (vgl. Abbildung 4.44). Das gleiche Verhalten zeigt sich bei PLY-PO. Beide Werkstoffe bilden die untere Grenze des Fähigkeitspektrums der untersuchten Werkstoffe ab. PLY-ID zeigt ebenso vergleichbare Klassen zwischen Scheiben- und Plattenbelastung, lediglich kc_2 (die Werkstoffsteifigkeit) unterscheidet sich um eine Klasse. Es schließt sich SWP-3F an, das ein verhältnismäßig heterogenes Verhalten zeigt. Besonders bei Scheibenbelastung variieren die Fähigkeitsklassen zwischen drei und null. Die verhältnismäßig hohe Steifigkeit bei niedriger Brucharbeit und reduzierter Schlagbrucharbeit deutet auf ein sprödes Werkstoffverhalten hin. Gleiches gilt für PLY-BB, PLY-KQ und PLY-RP jeweils bei Scheibenbelastung. Hier liegen die Fähigkeitsklassen der Brucharbeit je zwei Klassen unter der Steifigkeit, die Schlagbrucharbeit eine Klasse unter der Steifigkeit. Dies kann ebenso als Indikator für ein sprödes Werkstoffverhalten gedeutet werden. Zäh-e Eigenschaftsprofile zeigen hingegen die gleichen Werkstoffe (PLY-BB, PLY-KQ und PLY-RP) bei Plattenbelastung. Hier liegen die Klassen der Bruch- bzw. Schlagbrucharbeit gleich auf oder sind eine Klasse erhöht gegenüber der Steifigkeit. In Summe zeigt sich über die Werkstoffe betrachtet eine große Inhomogenität der Charakteristik.

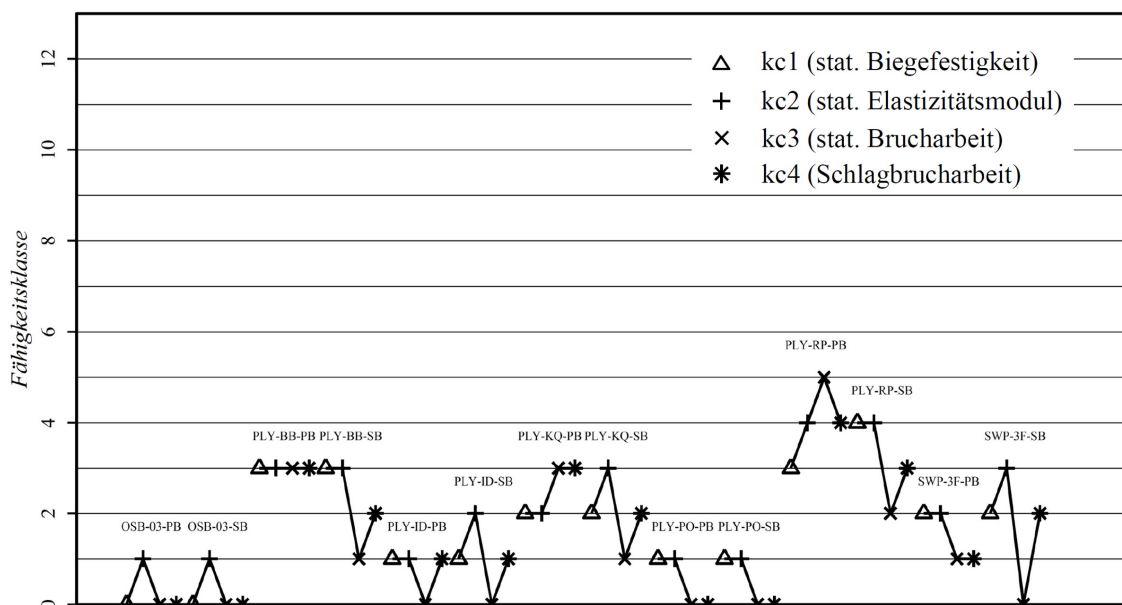


Abbildung 4.45: Fähigkeitsklassen kc_1 bis kc_4 der in der Querschnittsmessreihe geprüften Werkstoffauswahl, Plattenbelastung (PB) und Scheibenbelastung (SB) Werkstoffe entsprechend Tabelle 3.3, S. 72

Das Klassenmodell ist von seinen Grenzwerten nach oben hin so angelegt, dass wesentlich leistungsfähigere Werkstoffe ebenso klassifiziert werden können. Vorstellbar sind hier Sperrhölzer oder Schichthölzer auf Basis von Hartholzfurnier, verdichtete Sperr- oder Schichthölzer oder faserverstärkte Verbundwerkstoffe auf Holzbasis. Perspektivisch stellen diese Werkstoffe eine leistungsfähige Alternative gerade in Bezug auf schlagartig belastete und sicherheitskritische Bauteile dar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

5.1.1 Durchgeführte Arbeiten

Entsprechend der Zielstellung nach einer vergleichenden Klassifizierung der Holzwerkstoffe bei schlagartiger Belastung wurden zunächst die notwendigen Grundlagen zu den strukturellen Eigenschaften der Holzwerkstoffe erarbeitet. Unter dem Fokus der Schlagprüfung wurden verfügbare Quelle einerseits hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Bruchschlagarbeit und andererseits auf die Technik (Instrumentierung) beim Schlagversuch analysiert. Ebenso wurden die Normen zur Schlagprüfung verschiedener Werkstoffgruppen mit einbezogen. Im Bereich der Schlagprüfung von Holzwerkstoffen ist der Stand der Technik überschaubar, was die Quellenlage mit Hinweisen zu charakteristischen Größen, Versuchstechnik oder Einflussparametern betrifft. So wurden Maßgaben für die Instrumentierung aus anderen Bereichen übernommen. Es wurde ein Konzept zur Schlagprüfung mittels eines adaptierten 150 J Schlagpendels erarbeitet. Dieses umfasst neben der mechanischen Änderungskonstruktion des Schlagpendels auch den Aufbau der Messkette, sowie deren Applikation am Pendel. Hierzu wurde eine neuartige Hammerkopfkonstruktion unter maschinendynamischen Gesichtspunkten entwickelt. Es wurden umfangreiche Analyse- und Entwicklungsaufgaben zur Umsetzung des instrumentierten Schlagpendels durchgeführt. Mehrere Varianten des Hammerkopfs mit integriertem Messsystem wurden entwickelt und in modalen und transienten FEM-Simulationen auf ihrer Schwingungseigenschaften hin untersucht. Eine Darstellung der einzelnen Entwicklungsschritte kann aus Gründen des Umfangs nicht stattfinden. Dennoch stellen diese Arbeiten einen wesentlichen Teil der Arbeit dar, der letztendlich zum realisierten Messsystem führte. Die erhaltenen Messwerte des realisierten Systems wurden in Vorversuchen statisch und dynamisch auf Plausibilität geprüft. Das System wurde auf störende Eigenschwingungen hin analysiert und diese mittels geeignetem Filter aus den erhaltenen Signalen weitgehend eliminiert. Es wurde die Softwareseite des Prüfsystems (unterteilt in Datenakquise und Datenanalyse) umgesetzt. An Vorversuchsmessreihen wurde ein neues Verfahren zur Abschätzung ausreichend großer Stichproben entwickelt. Dieses nutzt den gesamten Kraftverlauf der Messung und ist nicht auf charakteristische Einzelwerte angewiesen. Die Stichprobengröße konnte für alle Chargen der Messreihen als ausreichend bezeichnet werden. Weiterhin wurde ein Analyseverfahren entwickelt, das es gestattet den linearen Bereich in Kraft-Verformungs-Kurven zu ermitteln.

Es wurden Langzeitmessungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in einer beispielhaft ausgewählten Produktionsstätte durchgeführt und analysiert. Hieraus lassen sich typische Klimazustände für den Jahresverlauf ableiten. Weiterhin wurden thermische Schädigungsszenarien im Sinne thermischer Zersetzung als Versuchsparameter mit aufgenommen. Aus der Vielfalt der Holzwerkstoffe wurden zunächst die Gruppen herausgearbeitet, die hinsichtlich ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit ein Einsatzpotenzial in der Produktionstechnik / im Maschinenbau erwarten lassen. Aus diesen wurden einzelne Vertreter (ein OSB-, fünf PLY- und ein SWP-Werkstoff) unter der Maßgabe möglichst hoher Diversität ausgewählt. Für die Referenzmessungen des statischen Biegeversuchs wurden identische Geometrien wie beim Schlagversuch angewendet.

Das Versuchssetup wurde in Querschnittmessreihe (alle Werkstoffe werden statischen und schlagartigen Biegeversuchen bei Normklima unterzogen) und Längsschnittmessreihe (drei ausgewählte Werkstoffe werden bei abweichenden Konditionierungen im Schlagversuch geprüft) aufgeteilt. So konnte ein darstellbarer Einzelversuchsumfang erreicht werden. Abschließend werden im methodischen Teil der Arbeit die wichtigsten analytischen und statistischen Verfahren und Methoden angegeben.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurden insgesamt 540 Einzelversuche durchgeführt. Die Kennwerte zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften wurden mittels Algorithmen aus den Kraft-Verformungs-Kurven abgeleitet und in geometrieunabhängige bezogene Größen umgerechnet. Aus deren Verteilungen konnten die charakteristischen Werte (Quantile) berechnet werden. Es zeigten sich teils starke Korrelationen der bezogenen Größen aus statischem Biegeversuch und Schlagbiegeversuch. Die ermittelte Bruchlänge, als bezogene Größe im statischen und im Schlagversuch, korreliert nur mäßig und mit keiner weiteren erhobenen Größe. Die Werkstoffe konnten anhand verschiedener bezogener Größen charakterisiert werden. Sie zeigten untereinander und in Abhängigkeit der Belastungsrichtung, trotz teilweise verhältnismäßig großer Streuungen der erhobenen Kennwerte, teils deutliche Unterschiede. In den Versuchen der Längsschnittmessreihe wurden verschiedene thermische Belastungen der Werkstoffe mit und ohne Reklimatisierung durchgeführt. Es zeigten sich keine eindeutigen und einheitlichen Effekte auf die erhobenen Größen. Gleiches gilt für die mit Kerbgeometrie geprüften Proben. Es kann so eine verhältnismäßige Unempfindlichkeit der Bruchschlagarbeit der Werkstoffe gegenüber kurzfristigen (wenige Tage) thermischen Belastungen festgestellt werden. Gleiches gilt für das Einbringen von konstruktiven Kerben. Abschließend, wurde ein Modell zur Einführung von Fähigkeitsklassen der mechanischen Leistungsfähigkeit erarbeitet. Dieses gestattet die integrale Bewertung von, nach Maßgabe dieser Arbeit geprüften, Holzwerkstoffen. So können Vergleiche der Leistungsfähigkeit zur Werkstoffvorauswahl angestellt werden.

5.1.2 Kritische Würdigung

Das entwickelte Messsystem ist fähig Messungen des Schlagbiegeversuchs hinreichend genau und zeitlich hoch aufgelöst aufzuzeichnen. Verbesserungsfähig ist der mechanische Aufbau des Pendels selbst. Hier sollten bei einem neuen Messsystem von vornherein andere Paradigmen zur Prüfsystementwicklung gelten. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen. Es sollte eine motorisch einstellbare Hammeranhebung, zur Einstellung von Nennarbeitsvermögen und Auftreffgeschwindigkeit vorgesehen werden. Diese ermöglicht eine, für heterogene Holzwerkstoffe dringend anzuratende, Anpassung der Schlagenergie an die Werkstofffestigkeit, -steifigkeit und -dichte. Die Schlagenergie zum Vergleich verschiedener Holzwerkstoffe sollte in einem festen Verhältnis zu deren Bruchenergie im statischen Biegeversuch stehen. Die Messkette, aufgebaut aus industrieller Messtechnik, ist geeignet die beim Schlagversuch auftretenden Kraft-Verformungs-Verläufe zu erfassen. Die Analog-Digital-Wandlung bestimmt dabei die Grenze der

zeitlichen Auflösung. Der Beschleunigungssensor ist bei den vorliegenden Bedingungen an seiner Messbereichsgrenze angekommen. Ohnehin zeigte sich dieser Sensor für die eigentliche Messung obsolet. Der Wegverlauf des Pendels kann mittels des Impulserhaltungssatzes und dem gemessenen Kraftsignal bestimmt werden. Schwingungen des mechanischen Aufbaus des Messsystems verfälschen das Beschleunigungssignal mit zunehmender, beim Schlag vom Pendel aufgenommener Energie. Generell muss beim Aufbau eines neuen Messsystems von vornherein auf Eigenschwingungen des Systems in allen Komponenten geachtet werden.

Zum methodischen Aufbau der Versuchsreihe und zu möglichen Kritikpunkten werden ebenso einige Punkte angemerkt. In der vorliegenden Arbeit wurde sich darauf beschränkt, die Werkstoffe bei Scheiben- und Plattenbelastung in Hauptrichtung der Platten zu prüfen. Ein Vergleich zur Nebenrichtung wurde nicht durchgeführt. Für eine vollständige Charakterisierung der Plattenwerkstoffe ist dieser aber notwendig. Die thermischen Belastungen im Sinne von Temperatur-Zeit-Regimen zeigten kaum Einfluss auf die erhaltenen Kennwerte Schlagbrucharbeit. Es scheint geboten in weiteren methodischen Untersuchungen verschieden große Zeitdauern einer Temperaturstufe zu prüfen. Die Untersuchung von Klimaregimen in Produktionsstätten ist nur für einen beispielhaften Einzelfall vorgenommen wurden. Diese Einschränkung bei der Auswahl der Klimadaten auf nur eine konkrete Anwendung stellt ebenso einen möglichen Kritikpunkt dar.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Klassenmodell zum integralen Werkstoffvergleich als Hilfsmittel bei der Werkstoffvorauswahl kann nur Werkstoffe im Allgemeinen vergleichen. Die Werte der Klasse entsprechen dabei den unter standardisierten Versuchsbedingungen gemessenen Kennwerten des statischen Biegeversuchs und des Schlagbiegeversuchs. Die Skalen der Klassen sowie deren Maxima und Minima sind subjektiv gewählt. Andere Einteilungen und Grenzwerte der Klassen sind möglich. Die Dimensionierung konkreter Bauteile ist mit den angegebenen charakteristischen Klassenwerten der Brucharbeit und der Bruchschlagarbeit a priori nicht möglich (vgl. Kapitel 1.2, S. 21 und Kapitel 2.5, S. 39). Für konkrete sicherheitsrelevante Bauteile sind reale Einsatzbedingungen d. h. Bauteilabmessungen, klimatische Zustände, reale Kerben und einsatznahe Belastungs-Zeit-Regime abzubilden und am Bauteil zu prüfen.

5.2 Ausblick

5.2.1 Vorschlag für ein Prüfkonzert zur Schlagprüfung an Bauteilen

Soll ein konkretes Bauteil, das schlagartigen Belastungen ausgesetzt ist und das eine sicherheitsrelevante Funktion erfüllt, (vgl. Abbildung 5.1) entwickelt werden, können die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Werkstoffklassen Orientierung bei der Werkstoffvorauswahl bieten. Für die notwendige Sicherheit sorgt aber nur ein Versuch am realen Bauteil unter einsatznahen Bedingungen. Aus Sicht des Autors ist eine Prüfmethodik für prototypische Bauteile unter schlagartigen Belastungen (Impact) erforderlich. Es muss möglich werden, die verhältnismäßig

eingeschränkten Möglichkeiten des Schlagbiegeversuchs zu erweitern. Besonders die Prüfung ganzer Bauteile oder Baugruppen im Zusammenspiel mit deren Verbindungstechnik verspricht praxisrelevante Erkenntnisse über das Verhalten bei kritischen Belastungsgeschwindigkeiten. Neben der instrumentierten Prüfung durch sensoriell erfasste Kraft-Verformungs-Verläufe, muss der Schadensmechanismus phänomenologisch ergründet und beschrieben werden. Besonders die verschiedenartig aufgebauten Holzwerkstoffe bieten hier eine Fülle an möglichen Versagensmechanismen, die nicht immer einzig durch Biegebelastungen charakterisiert werden können.



Abbildung 5.1: Anschlag eines Skidförderers (links unterhalb Bildmitte). Bei Fehlpositionierung des Skids läuft dieser ungebremst auf den Anschlag auf [Volkswagen 2014b]

Das Prüfkonzept des Impactors muss folgende Anforderungen erfüllen können: i) das Nennarbeitsvermögen und die Auftreffgeschwindigkeit müssen in bestimmten Grenzen einstellbar sein, ii) der Impactor muss mit Sensoren ausgestattet sein, die eine zeitlich hoch aufgelöste Kraft- und (direkte) Wegmessung erlauben, iii) der Impactor muss in Wirkrichtung mechanisch vom Rest des Aufbaus entkoppelt sein und iv) der Impactor muss das gesamte Nennarbeitsvermögen an den Probekörper / das Bauteil abgeben können. Die einzelnen Punkte resultieren aus verschiedenen, der Zielstellung der Bauteilprüfung geschuldeten, Anforderungen. Die Einstellung des Arbeitsvorrates ist notwendig, um die Belastung dem Bauteiltragvermögen anzupassen. So können zunächst verschieden hohe Belastungen bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten

ausgeübt werden (vgl. Abbildung 5.2), um sich an die Versagensgrenze des Bauteils anzunähern. Ebenso wird es möglich, bei einem niedrigen Arbeitsvorrat das Bauteil vorzuschädigen, ohne eine vollständige Zerstörung zu verursachen. Die Forderung nach sensorieller Ausstattung des Prüfsystems greift verhältnismäßig weit. So ist vor allem eine direkte Wegmessung des Impactors und des geprüften Bauteils an der Wirkstelle vorzusehen. Lässt sich dies am Impactor noch verhältnismäßig einfach ausführen, ist die direkte Wegmessung am Bauteil ungleich komplexer. Hier sind nur berührungslose Messsysteme denkbar, da sonst mit einer Zerstörung des Messsystems gerechnet werden muss.

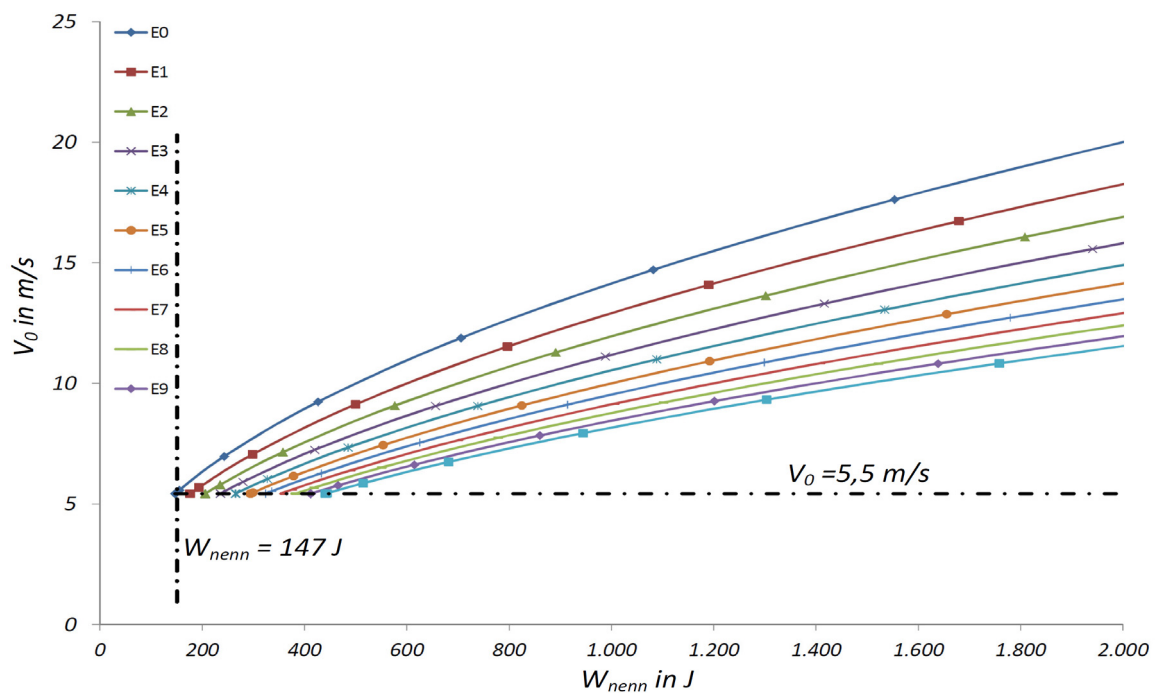


Abbildung 5.2: Arbeitsbereich des Impactors, Auftreffgeschwindigkeit über dem Nennarbeitsvermögen, E0: Impactor ohne Zusatzmasse, E1 - E9: Zusatzmassen von jeweils 2 kg

Das Kraftmesssystem kann ähnlich ausgeführt werden wie am Prüfsystem in der vorliegenden Arbeit. Die Grenzfrequenz der verwendeten Messkette sollte die auch in der Arbeit angeführten 100 kHz nicht unterschreiten. Die Entkopplung des Impactors vom Prüfsystem in Wirkrichtung ist dahingehend unerlässlich, da sonst Eigenschwingungen des Systems auf die Messtechnik übertragen werden. Schließlich muss der Impactor mechanisch so ausgeführt werden, dass er unbeschädigt den gesamten Nennarbeitsvorrat an das zu prüfende Bauteil abgeben kann. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zum Prinzip des Schlagpendels dar, bei dem nur wenige Prozent des Arbeitsvorrates schadensfrei auf den Probekörper übertragen werden können. Bei höheren Brucharbeiten nimmt die Mechanik und das Messsystem unweigerlich Schaden. Besonders an das Kraftmesssystem werden so komplexe Anforderungen bzgl. zeitlicher Auflösung und Messbereich gestellt.

Während der Tätigkeit des Autors an der Professur Fördertechnik der Fakultät für Maschinenbau der TU Chemnitz konnte ein Konzept für eine Prüfmaschine nach dem Prinzip des Impactors entwickelt werden (vgl. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4). Dieses ist als Fallwerk mit untenliegender variabler Proben- (Bauteil-) Aufnahme konzipiert. Zur Erhöhung der Auftreffgeschwindigkeit und damit auch des Nennarbeitsvermögens ist eine Vorspannvorrichtung des Fallhammers vorgesehen. Dieser kann mittels vorgespannter Federpakete eine höhere Auftreffgeschwindigkeit als beim freien Fall erreichen. In den Fallhammer können zusätzliche Gewichte zur Erhöhung des Nennarbeitsvermögens integriert werden. Auf diese Weise werden Auftreffgeschwindigkeit und Nennarbeitsvermögen in Grenzen einstellbar (vgl. Abbildung 5.2).

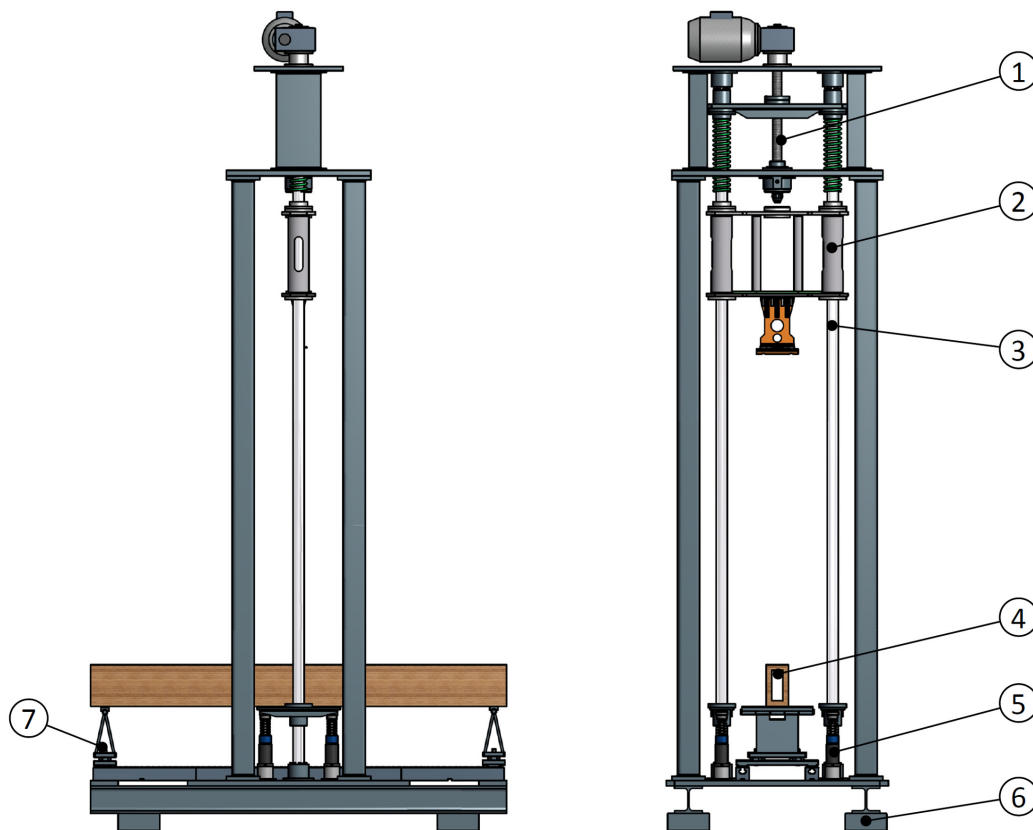


Abbildung 5.3: Konzept eines Impact-Prüfstandes mit variabler Auftreffgeschwindigkeit und variablem Nennarbeitsvermögen. 1 Vorspanneinheit, 2 Fallhammer, 3 Führungen, 4 Probekörper / Bauteil, 5 Dämpfungselemente, 6, Aufstellelemente, 7 Einstellbare Probekörperaufnahme

Die Probenaufnahme ist mittels Rastersystem einstellbar gestaltet und kann durch bauteilspezifische Aufnahmen ersetzt werden. Über ein elektro-pneumatische Spannvorrichtung kann der Fallhammer ausgelöst werden. Zusätzliche Feder-Dämpfer-Elemente nehmen überschüssige, beim Bruch im Bauteil nicht aufgenommene, Energie auf. Sensorträger und Hammerfinne sind austauschbar gestaltet, so das verschiedene Messtechnik und Hammerfinngeometrien zum Einsatz kommen können (vgl. Abbildung 5.4). Das beschriebene Prüfsystem ermöglicht die einsatznahe Simulation schlagartiger Belastungen an Bauteilen fördertechnischer Einrichtungen.

Für den Einsatz technischer Holzwerkstoffe in Anwendungen der Produktionstechnik, besonders der Fördertechnik, stellt diese Prüfung eine Voraussetzung unter den genannten Lastfällen dar. Die komplex aufgebauten Holzwerkstoffe entziehen sich einer allgemeingültigen Charakterisierung des Versagensmechanismus unter schlagartig auftretenden Lasten. Sollen diese Werkstoffe eine Renaissance als Konstruktionswerkstoff in der Produktionstechnik erfahren, ist es unerlässlich Referenzanwendungen zu schaffen und deren Leistungsfähigkeit mittels Versuchen an Prototypen darzustellen. Das in diesem Kapitel vorgeschlagene Prüfsystem ist das geeignete Mittel hierfür. Die in der Arbeit gelegten Grundlagen und Ansätze zu Aufbau und Validierung des Messsystems sowie zur Bewertung der Ergebnisse können einen Beitrag zur Umsetzung eines vergleichbaren Systems leisten.

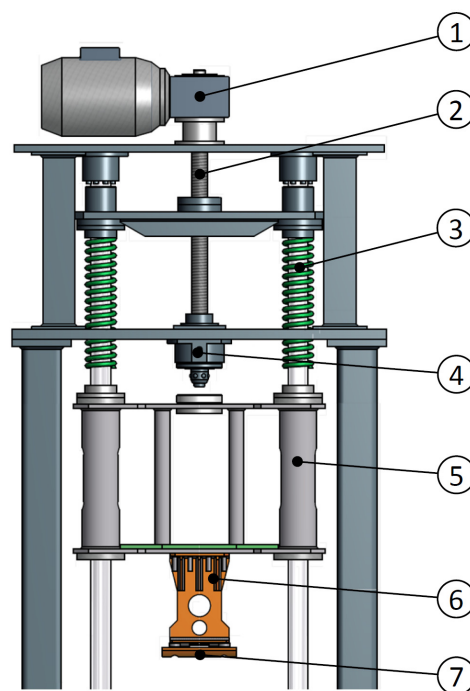


Abbildung 5.4: Vorspanneinheit und Fallhammer des Impactors. 1 Antrieb der Vorspannung, 2 Kugelumlaufspindel, 3 Vorspannfeder, 4 elektro-pneumatische Entriegelung, 5 Führungsschlitten des Fallhammers, 6 Sensorträger (austauschbar), 7 Hammerfinne mit Messsystem (austauschbar)

5.2.2 Weiterführende Arbeiten

Mit Hinblick auf die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche an Werkstoffproben ist die Erweiterung der Datenbasis für das entwickelte Klassenmodell erstrebenswert. Die große Vielfalt an Holzwerkstoffen bietet umfassenden Forschungsbedarf. Dies besonders im Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Plattenaufbau, Klebstoff und mechanischer Leistungsfähigkeit bei schlagartiger Belastung. Ebenso sind die Fähigkeitsklassen für die jeweiligen Holzwerkstoffe in Nebenrichtung zu bestimmen. Eine ergänzende Sammlung an Konstruktionsbeispielen und Bau-

mustern aus bestimmten Holzwerkstoffen in Kombination mit deren Belastungen böte Hinweise auf geeignete und ungeeignete Werkstoffe. Zur Charakterisierung auf Bauteilebene sind, neben der Umsetzung des im vorangehenden Kapitel beschriebenen Prüfsystems, weitere Arbeiten erforderlich, um den Einsatz von Holzwerkstoffen bei schlagartigen Belastungen sicher zu gestalten. In der Arbeit fand eine Einschränkung auf Klimadaten nur einer beispielhaften Anwendung von Holzwerkstoffen in der Produktionstechnik statt. Die Daten sind in gewissem Maß als repräsentativ zu betrachten, da der Mensch in den betrachteten Fällen das Maß der klimatischen Bedingungen in der Produktion bestimmt. So gelten automatisch bestimmte Randbedingungen, die auch in anderen Produktionsstätten ähnlich sind. Darüber hinaus erlauben es in aller Regel auch die Produktionsprozesse nicht, wesentlich größere Schwankungen zuzulassen. Dennoch bietet die Analyse klimatischer Schwankungen in Produktionsstätten für die Nutzbarmachung der Holzwerkstoffe einen möglichen Anknüpfungspunkt für weitere Forschungsarbeiten. Besonders lokal auftretende, vom globalen Klima der Produktionsstätte wesentlich abweichende, Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen gilt es dabei zu berücksichtigen. Ebenso ist die Erweiterung der untersuchten Temperaturbereiche in den Minusbereich hin denkbar. Methoden zur beanspruchungsgerechten Konstruktion mit Holzwerkstoffen hinsichtlich Schlagbelastung sind abzuleiten und mittels Versuchen nachzuweisen. Besonders die Verbindungstechnik in Kombination mit dem Holzwerkstoff birgt hier noch umfangreichen Forschungsbedarf.

6 Literaturverzeichnis

- Ambrozy, H. G.; Giertlova, Z.:** Planungshandbuch Holzwerkstoffe Technologie – Konstruktion – Anwendung. Wien, New York: Springer, **2005**.
- Apitz, R.:** Vorschlag von Festigkeitsklassen für Nadelschnittholz und Möglichkeiten der Sortierung. In: Holztechnologie, Jahrgang 27, Heft 6, S. 299-300, **1986**.
- Ashby, M. F.:** Materials Selection in Mechanical Design - Das Original mit Übersetzungshilfen. Heidelberg: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, **2007**.
- Ashby, M. F.; Jones, D.; Schepp, P.:** Ingenieurwerkstoffe - Einführung in Ihre Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, **1986**.
- ASTM D3499-11:** Standard Test Method for Toughness of Wood-Based Structural Panels, ASTM International, West Conshohocken, PA, **2011**.
- ASTM-Proceedings 1922:** Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Meeting, Atlantic City, NJ. American Society for Testing Materials, Volume 22, Part II, **1922**.
- Bargel, H.-J.:** Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, **2012**.
- Becker, H.; Noack, D.:** Studies on dynamic torsional viscoelasticity of wood. In: Wood Science and Technology, Volume 2, Issue 3, S. 213-230, **1968**.
- Bodig, J.; Jayne, B.:** Mechanics of Wood and Wood Composites. Malabar: Krieger Publishing Company, **1993**.
- Böhme, P.; Dube, H.; Faust, K.; Fischer, K.; Hartmann, E.; Kehr, E.; Lenhart, K.; Luthardt, H.; Neumüller, J.; Zeppenfeld, G.:** Werkstoffe aus Holz. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, **1975**.
- Boos, D.; Stefanski, L.:** Essential Statistical Inference - Theory and Methods. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer-Verlag, **2013**.
- Bröker, F.; Salamon, S.:** Instrumentierung eines Pendelschlagwerkes für die Holzprüfung. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 47, Heft 3, S. 93 – 97, **1989**.
- Bucur, V.:** Delamination in wood, wood products and wood-based composites. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer-Verlag, **2011**.
- DIN 52189 (1981)** Prüfung von Holz - Schlagbiegeversuch - Bestimmung der Bruchschlagarbeit. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN 743-2 (2012) Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 10045 (1991) Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy Teil 1: Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 12369-1 (2001) Holzwerkstoffe - Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Teil 1: OSB, Spanplatten und Faserplatten. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 12369-2 (2011) Holzwerkstoffe - Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Teil 2: Sperrholz. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 12369-3 (2009) Holzwerkstoffe - Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Teil 3: Massivholzplatten. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 13353 (2009) Massivholzplatten (SWP) – Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 13986 (2005) Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 14279 (2009) Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 1995-1-1 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 300 (2006) Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) - Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 310 (1992) Holzwerkstoffe Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 312 (2010) Spanplatten – Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 316 (20090) Holzfaserplatten - Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 322 (1993) Holzwerkstoffe Bestimmung des Feuchtegehaltes. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN 636 (2012) Sperrholz – Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 13802 (2006) Kunststoffe - Verifizierung von Pendelschlagwerken - Charpy-, Izod- und Schlagzugversuch. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 14556 (2006) Stahl - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (V-Kerb) - Instrumentierte Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 148-1 (2011) Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 148-2 (2009) Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 2: Prüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerke). Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 148-3 (2009) Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 3: Vorbereitung und Charakterisierung von Charpy-V-Referenzproben für die indirekte Prüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerke). Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 179-1 (2006) Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 179-2 (2000) Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften Teil 2: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 180 (2007) Kunststoffe - Bestimmung der Izod-Schlagzähigkeit. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

DIN EN ISO 50115 (1991) Prüfung metallischer Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch - Besondere Probenform und Auswerteverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth-Verlag.

- Dunky, M.; Niemz, P.:** Holzwerkstoffe und Leime - Technologie und Einflussfaktoren. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, **2002**.
- Eberhardsteiner, J.:** Mechanisches Verhalten von Fichtenholz - Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften. Wien, New York: Springer-Verlag, **2002**.
- Eckardt, R.:** Untersuchungen an Verbindungselementen für Holzkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau, Dissertation Technische Universität Chemnitz, **2013**.
- Eckardt R.; Eichhorn, S.:** Logistiksysteme in der Automobilproduktion aus Holzwerkstoffen. Tagungsband zum 10. Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“. Messe Erfurt, **2014**.
- Efron, B.:** Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. The Annals of Statistics, Volume 7, Number 1, S. 1 – 26, **1979**. Online verfügbar unter <http://projecteuclid.org/euclid.aos/1176344552> (10.06.2015)
- Eichhorn, S.:** Berechnungsansatz für Strukturbauteile aus Holzfurnierlagenverbundwerkstoff – WVC. Dissertation Technische Universität Chemnitz, **2013**.
- Evans, P.; Beutel, P.; Hoggett, A.; Stodart, D.:** The impact bending strength of slash pine after preservative treatment. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 49, Heft 7-8, S. 270, **1991**.
- Falk, D.; Krause, P.; Landsknecht, U.; Tiedt, G.:** Metalltechnik Tabellen. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH, **1999**.
- Ghelmeziu, N.:** Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Bauhölzern. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 1, Heft 15, S. 585 – 601, **1938**.
- GnuR_ars 2015:** The R-Foundation, Adjusted R-square (Package vegan version 2.2.1). Online verfügbar unter <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/vegan/html/RsquareAdj.html> (11.06.2015)
- GnuR_bwf 2015:** The R-Foundation, Butterworth filter polynomial coefficients (Package signal version 0.7.4). Online verfügbar unter <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/signal/html/butter.html> (11.06.2015)
- GnuR_q 2015:** The R-Foundation, Quantile (Package stats version 3.2.0). Online verfügbar unter <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/stats/html/quantile.html> (11.06.2015)
- GnuR_rm 2015:** The R-Foundation, Running Mean (Package broman version 0.55.2). Online verfügbar unter <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/broman/html/runningmean.html> (11.06.2015)

Hake E.; Meskouris, K.: Statik der Flächentragwerke. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, **2007.**

Hennig, R.; Trendelenburg; Kollmann; Lüdtke, M.; Kratky, O.; et. al.: Schrifttumsberichte. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 3, Heft 7-8, S. 252 – 269, **1940.**

Höher, P.: Grundlagen der digitalen Informationsübertragung - Von der Theorie zu Mobilfunkanwendungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, **2013**

Holzweißig, F.; Dresig, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. Leipzig, Köln: Fachbuchverlag Leipzig GmbH, **1994.**

Israel, G. D.: Determining Sample Size. University of Florida (Fact Sheet PEOD-6), **1992.** Online verfügbar unter <http://edis.ifas.ufl.edu/pd006> (10.06.2015)

Kießl, K.; Möller, U.: Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 47, Heft 8, S. 317 - 322, **1989.**

Kohl, D.; Wicke, T.; Alsmann, M.; Böhm, S.: Holz in der modernen automobilen Karosserie. In: Holztechnologie Heft 6/2014, S. 44 – 49, **2014.**

Köhler, M.: Keine erhöhten Risiken durch PMDI-Binder in Holzwerkstoffen. In: IBOMagazin Heft 1/2011, S. 23 – 25, **2011.** Online verfügbar unter http://www.ibo.at/documents/PMDI_in_Holzwerkstoffen.pdf (10.06.2015)

Kollmann, F.: Die mechanischen Eigenschaften verschieden feuchter Hölzer im Temperaturbereich von - 200 bis + 200 °C. VDI – Forschungsheft 403. Berlin: VDI-Verlag GmbH, **1940.**

Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holz Werkstoffe - I. Band. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, **1951.**

Kollmann, F.: Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 10, Heft 5, S. 187 - 197, **1952.**

Kollmann, F.: Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper. VDI – Forschungsheft 520. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, **1967.**

Kollmann, F.; Schmidt, E.; Kufner, M.; Fengel, D.; Schneider, A.: Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch mechanische und thermische Beanspruchung. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 27, Heft 11, S. 407 – 425, **1969.**

- Krech, H.:** Größe und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 18, Heft 3, S. 95 – 105, **1960**.
- Krug, D.; Tobisch, S.:** Einsatz von Proteinen als Bindemittel für Holzwerkstoffe. In: European Journal of Wood and Wood Products, Volume 68, Issue 3 S. 289 – 301, **2010**.
- Kubojima, Y.; Okano, T.; Ohta, M.:** Bending strength and toughness of heat-treated wood. In: Journal of Wood Science Volume 46, Issue 1, S. 8 – 15, **2000**.
- Lee, O.; Hong, S.:** Dynamic fracture characteristics of highly brittle materials by using Instrumented Charpy Impact Test. In: KSME International Journal, Volume 11, Issue 5, S. 513 - 520, **1997**.
- Leijten, A.:** Heat treated wood and the influence on the impact bending strength. In: HERON, Volume 49, Issue 4, **2004**. Online verfügbar unter <http://heronjournal.nl/49-4/4.pdf> (10.06.2015)
- Lenhoff, M. W.; Santner, T. J.; Otis, J. C.; Peterson, M. G.; Williams, B. J.; Backus, S. I.:** Bootstrap prediction and confidence bands: a superior statistical method for analysis of gait data. In: Gait and Posture, Volume 9, S. 10 – 17, **1999**.
- Lorriot, T.; Martin, E.; Quenisset, J.; Rebiere, J.:** Dynamic analysis of instrumented CHARPY impact tests using specimen deflection measurement and mass-spring models. In: International Journal of Fracture, Volume 91, S. 299 - 309, **1998**.
- Müller, C.; Eichhorn, S.; Krug, D.; Weber, A.:** Holzwerkstoffe in technischen Anwendungen - Anforderungen aus Sicht des Maschinenbaus. Tagungsband zum 9. Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“. Messe Erfurt, **2012**.
- National-Instruments 2015:** National Instruments Corporation, Systemdesignsoftware NI LabVIEW. Online verfügbar unter <http://www.ni.com/labview/d/> (11.06.2015)
- Niemz, P.:** Physik des Holz und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., **1993**.
- Niemz, P.:** Orientierende Untersuchungen zur Kerbschlagzähigkeit von Holzwerkstoffen, In: Holz-Zentralblatt, Heft 6, S. 66, **1994**.
- Oberbach, K.; Saechtling, H.:** Saechtling Kunststoff Taschenbuch. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, **2004**.

- Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C.:** Influence of temperatur on cracking and mechanical properties of wood during wood drying – a review. In: *BioResources*, Volume 2, Issue 4, S. 789 - 811, **2007**. Online verfügbar unter http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_2_4_789_811_Oltean_TH_Cracking_Wood_Drying_Review (10.06.2015)
- Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C.:** Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. In: *European Journal of Wood and Wood Products*, Volume 69, Issue 3, S. 451 – 457, **2011**.
- de Palacios, P.; Esteban, L.; Garcia; Guindeo, A.; Fernandez, F. G.; Canteli, A. F. N.:** Variation of impact bending in the wood of *Pinus sylvestris* L. in relation to its position in the tree. In: *Forest products Journal*, Voulme 58, Issue 3, **2008**. Online verfügbar unter <http://www.freepatentsonline.com/article/Forest-Products-Journal/177361977.html> (10.06.2015)
- Pechmann, H.:** Untersuchungen über die Bruchschlagarbeit von Rotbuchenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jahrgang 11, Heft 9, S. 361 - 367, **1953**.
- Renovo 2015:** Renovo Hardwood Bicycles. Online verfügbar unter <http://www.renovobikes.com/pages/aerowood#> (10.06.2015)
- R-Foundation 2015:** The R Foundation, The R Project for Statistical Computing. Online verfügbar unter <http://www.r-project.org/> (11.06.2015)
- Schindler, H.-J.:** Abschätzung von Bruchzähigkeitskennwerten aus der Bruch- oder Kerbschlagarbeit. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Volume 32, Issue 6, S. 544 – 551, **2001**. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-4052%28200106%2932:6%3C544::AID-MAWE544%3E3.0.CO;2-K/abstract> (10.06.2015)
- Schneider, H.:** Untersuchungen über das Verhalten von Holzwerkstoff-Platten bei Stoßbeanspruchung sowie über ihren dynamischen Elastizitäts- und Schubmodul. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jahrgang 24, Heft 2, S. 41 – 52, **1966**.
- Schönbach, H.:** Schlagbiegeversuche an Lärchenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jahrgang 2, Heft 6, S. 229 – 235, **1939**.
- Schwab, E.; Gyamfi, A.:** Verhalten von Furnierlagenholz bei schlagartiger Beanspruchung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jahrgang 43, Heft 11, S. 455 – 461, **1985**.

Seintsch, B.: Stellung der Holzwerkstoffe in der Kostenstruktur des Holz- und Papiergewerbes in Deutschland. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie 2011/3, Hamburg, **2011**. Online verfügbar unter http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/bitv/dn048917.pdf (10.06.2015)

Shterenlikht, A.; Hashemi, S.; Yates, J.; Howard, I.; Andrews, R.: Assessment of an instrumented Charpy impact machine. In: International Journal of Fracture, Volume 132, Issue 3, S. 297, **2005**.

Sinha, A.; Nairn, J.; Gupta, R.: The effect of elevated temperature exposure on the fracture toughness of solid wood and structural wood composites. In: Wood Science and Technology, Volume 46, Issue 6, S. 1127 – 1149, **2012**.

Smith, I.; Landis, E.; Gong, M.: Fracture and Fatigue in Wood. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., **2003**.

Tjeerdsma, B.; Pfeiffer, E.: Impact bending strength of AccoyaTM wood. SHR Timber Research, **2006**. Online verfügbar unter <http://www.accoya.com/wp-content/uploads/2011/05/Impact-Bending.pdf> (10.06.2015)

Topf, P.: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180 °C - Erste Mitteilung: Stand der Forschung. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrgang 29, Heft 7, S. 269 - 275, **1971**.

Volkswagen 2014a: Volkswagen AG WOB/ Dr. F. Drechsler. In: Produktionsanlagen aus Holz in der Autofabrik - VW testet erfolgreich Skidförderer aus Holzwerkstoff im Werk Wolfsburg, FNR Newsletter vom 03.11.2014.

Volkswagen 2014b: Volkswagen AG für wissenschaftliche Zwecke freigegeben.

Wagenführ, A.: Die strukturelle Anisotropie von Holz als Chance für technische Innovationen. Leipzig: Verlag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften, 2008.

Wagenführ, A.; Scholz, F.: Taschenbuch der Holztechnik. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, **2012**.

Witte, J.: Wissenschaftler erforschen Holz im Fahrzeugbau. In: VDI-Nachrichten, Heft 22/2012, **2012**. Online verfügbar unter <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Wissenschaftler-erforschen-Holz-im-Fahrzeugbau> (10.06.2015)

Wood Handbook Wood Handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report, Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. **2010**. Online

verfügbar unter http://www.fpl.fs.fed.us/products/publications/several_pubs.php?grouping_id=100&header_id=p (11.06.2015)

Xie, Y.; Fu, Q.; Wang, Q.; Xiao, Z.; Militz, H.: Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. In: European Journal of Wood and Wood Products, Volume 71, Issue 4, S. 401 – 416, **2013**.

Zuur, A.; Ieno, E.; Meesters, E.: A Beginner's Guide to R. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer Verlag, **2009**.

Anlagenverzeichnis

Tabelle I.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.11a, S. 123.....	180
Tabelle I.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.11b, S. 123.....	180
Tabelle I.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.12a, S. 124.....	180
Tabelle I.4: Zahlenangaben zu Abbildung 4.12b, S. 124.....	181
Tabelle I.5: Zahlenangaben zu Abbildung 4.14a-d, S. 126.....	181
Tabelle I.6: Zahlenangaben zu Abbildung 4.15, S. 127.....	182
Tabelle II.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.17a, S. 129.....	183
Tabelle II.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.17b, S. 129.....	183
Tabelle II.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.18a, S. 130.....	183
Tabelle II.4: Zahlenangaben zu Abbildung 4.18b, S. 130.....	184
Tabelle II.5: Zahlenangaben zu Abbildung 4.19, S. 131.....	184
Tabelle II.6: Zahlenangaben zu Abbildung 4.20, S. 132.....	185
Tabelle III.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.24, S. 137.....	186
Tabelle IV.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.30, S. 141.....	187
Tabelle IV.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.31, S. 142.....	187
Tabelle IV.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.32, S. 143.....	188
Tabelle V.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.33, S. 144	189
Tabelle V.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.34, S. 144.....	189
Tabelle V.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.35, S. 145.....	189
Tabelle VI.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.36, S. 146.....	190
Tabelle VI.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.37, S. 146.....	190
Tabelle VI.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.39, S. 148.....	190

I. Anlage: Zahlentafeln Querschnittsmessreihe statisch

Tabelle I.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.11a, S. 126

statistische Angaben Querschnittsmessreihe $v_{p,s}$ in mm/mm·100 % Durchbiegung an der Proportionalitätsgrenze bezogen auf die Probenlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,2	0,43	0,52	0,82	0,36	0,79	0,32	0,83	0,24	0,79	0,52	0,52	0,36	0,65
25 th percentile	0,38	0,49	0,59	0,88	0,54	0,82	0,38	0,85	0,53	0,88	0,55	0,67	0,37	0,69
Median	0,49	0,54	0,62	0,93	0,58	0,89	0,45	0,91	0,68	0,9	0,61	0,73	0,4	0,83
75 th percentile	0,51	0,59	0,67	1	0,69	0,92	0,54	0,94	0,73	0,96	0,62	0,9	0,43	1,04
upper whisker	0,57	0,6	0,72	1,07	0,91	0,93	0,73	1	0,9	1,01	0,7	0,93	0,44	1,1
Mean	0,45	0,51	0,64	0,93	0,62	0,87	0,47	0,91	0,62	0,9	0,6	0,76	0,41	0,85

Tabelle I.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.11b, S. 126

statistische Angaben Querschnittsmessreihe $f_{p,s}$ in N/mm ² Kraft an der Proportionalitätsgrenze bezogen auf die Querschnittfläche														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,3	0,29	0,87	1,5	0,35	0,81	0,44	1,17	0,22	0,6	0,98	1,21	0,49	1
25 th percentile	0,34	0,32	0,98	1,65	0,39	0,88	0,52	1,41	0,44	0,71	1,1	1,55	0,53	1,14
Median	0,37	0,35	1,08	1,74	0,48	0,93	0,57	1,55	0,58	0,79	1,17	1,71	0,6	1,3
75 th percentile	0,45	0,4	1,12	1,85	0,55	0,96	0,73	1,73	0,62	0,86	1,21	1,95	0,65	1,69
upper whisker	0,48	0,44	1,17	1,93	0,59	1,08	0,84	1,8	0,76	0,96	1,29	2,09	0,8	1,9
Mean	0,37	0,36	1,08	1,74	0,47	0,94	0,61	1,54	0,53	0,78	1,18	1,72	0,61	1,37

Tabelle I.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.12a, S. 127

statistische Angaben Querschnittsmessreihe $v_{max,s}$ in mm/mm·100 % Durchbiegung bei Maximalkraft bezogen auf die Probenlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	1,13	1,59	2,58	2,41	2,08	2	3,11	1,86	1,85	1,8	2,14	2,15	2,49	1,42
25 th percentile	1,41	1,72	2,91	2,49	2,27	2,01	4	1,92	2,08	2,04	2,33	2,54	2,49	1,59
Median	1,59	1,81	3,27	2,55	2,45	2,13	4,6	2,02	2,24	2,18	2,75	2,7	2,59	1,75
75 th percentile	1,77	2,04	3,54	2,68	2,64	2,24	4,64	2,08	2,6	2,4	3,1	2,88	2,74	2,28
upper whisker	1,92	2,32	4,08	2,82	2,96	2,53	5,12	2,22	3,09	2,64	3,53	3,04	2,74	2,41
Mean	1,57	1,89	3,29	2,55	2,46	2,17	4,22	2,02	2,32	2,21	2,74	2,67	2,65	1,88

Tabelle I.4: Zahlenangaben zu Abbildung 4.12b, S. 127

	statistische Angaben Querschnittsmessreihe $f_{max,s}$ in N/mm ² Kraft an der Proportionalitätsgrenze bezogen auf die Querschnittfläche													
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,74	0,73	3,11	3,19	1,28	1,75	2,27	2,06	1,4	1,29	3,43	4,13	2,2	1,99
25 th percentile	0,9	0,86	3,22	3,27	1,41	1,78	2,64	2,64	1,5	1,46	3,72	4,13	2,25	2,16
Median	1,01	0,94	3,36	3,34	1,46	1,91	2,75	2,8	1,56	1,62	4,01	4,24	2,51	2,49
75 th percentile	1,22	1,05	3,52	3,4	1,65	2,11	2,91	3,18	1,58	1,71	4,26	4,31	2,56	2,55
upper whisker	1,26	1,05	3,83	3,54	1,77	2,15	3,13	3,56	1,58	1,83	4,48	4,36	2,64	2,85
Mean	1,04	0,98	3,42	3,34	1,51	1,93	2,69	2,9	1,56	1,58	3,97	4,2	2,44	2,43

Tabelle I.5: Zahlenangaben zu Abbildung 4.14a-d, S. 129

	statistische Angaben Querschnittsmessreihe $w_{lin,s}$, $w_{nlb,s}$, $w_{rbb,s}$, $w_{B,s}$ in kJ/m ² Arbeit bezogen auf die Querschnittfläche													
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,04	0,06	0,48	1,28	0,14	0,71	0,17	1,12	0,06	0,5	0,64	0,77	0,2	0,77
25 th percentile	0,14	0,18	0,61	1,52	0,23	0,75	0,22	1,35	0,25	0,66	0,8	1,27	0,23	0,89
Median (a)	0,21	0,21	0,71	1,76	0,3	0,88	0,29	1,67	0,44	0,75	0,86	1,55	0,26	1,2
75 th percentile	0,23	0,25	0,78	1,84	0,44	0,91	0,46	1,8	0,47	0,89	0,92	2,16	0,33	1,93
upper whisker	0,28	0,33	0,89	2,08	0,54	1,05	0,69	2,04	0,73	0,96	1,01	2,36	0,36	2,27
Mean	0,19	0,2	0,74	1,71	0,32	0,87	0,35	1,6	0,39	0,74	0,87	1,64	0,29	1,34
lower whisker	0,88	1,21	9,8	8,81	3,09	3,27	17,75	5,24	2,41	2,12	9,72	10,53	7,69	2,25
25 th percentile	1,15	1,73	11,67	9,16	3,46	3,54	17,75	5,36	3,05	3,18	11,74	14,74	8,13	3,6
Median (b)	2,02	1,92	14,57	9,6	4,26	3,93	20,36	6,04	4,06	3,38	16,03	15,29	8,67	4,5
75 th percentile	2,22	2,56	16,37	10,46	4,91	4,63	21,13	7,02	5,16	4,18	19,04	18,04	10,46	6,72
upper whisker	2,97	3,8	21,96	11,33	5,52	6,03	25,71	9,01	6,32	5,36	20,61	20,95	13,49	7,22
Mean	1,85	2,23	14,86	9,6	4,27	4,25	18,78	6,35	4,11	3,53	15,52	15,87	9,13	4,76
lower whisker	1,97	2,99	8,74	4,82	2,5	0,02	9,85	2,45	0,05	0,04	22,33	4,62	0,1	2,35
25 th percentile	2,45	3,58	14,11	5,84	6,61	0,41	11,9	4,05	0,07	0,06	27,54	9,24	2,65	3,45
Median (c)	2,94	4,2	15,62	6,86	8,22	2,16	14,87	8,76	0,09	0,06	31,59	10,96	4	4,92
75 th percentile	3,6	4,99	18,33	7,59	9,85	3,4	17,67	13,19	0,1	1	36,43	13,09	7,06	8,33
upper whisker	3,85	6,48	22,32	9,04	12,45	5,33	24,77	16,7	0,1	1,74	42,54	16,05	10,67	12,52
Mean	3,12	4,75	16,37	6,79	8,57	2,16	15,27	8,86	0,92	1,04	31,49	10,87	5,4	6,03
lower whisker	3,17	4,89	25,95	15,68	7,73	4,11	25,48	7,95	2,93	3,8	42,28	22,24	9,68	7,82
25 th percentile	4,4	5,69	29,92	17,08	11,03	5,36	30,85	10,55	3,88	4,21	43,29	24,77	11,24	8,63
Median (d)	4,99	6,29	31,42	17,99	13,2	7,01	35,1	16,76	5,06	4,67	47,59	28,68	14,46	10,48
75 th percentile	5,61	8,3	34,01	19,15	14,56	10,01	38,9	22,07	6,88	5,02	49,27	30,96	18,52	16,7
upper whisker	6,61	8,47	38,81	20,48	16,14	11	43,2	27,51	9,76	5,02	51,42	36,18	19,59	17,09
Mean	5,16	7,19	31,97	18,09	13,16	7,28	34,39	16,81	5,42	5,31	47,88	28,38	14,82	12,13

Tabelle I.6: Zahlenangaben zu Abbildung 4.15, S. 130

statistische Angaben Querschnittmessreihe $\kappa_{b,s}$ in mm/mm·100 % Durchbiegung bei Maximalkraft bezogen auf die Probenlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	SPU	SSU	SPU	SSU	SPU	SSU	SPU	SSU	SPU	SSU	SPU	SSU	SPU	SSU
lower whisker	11,19	12,36	15,28	10,87	11,64	9,94	9,43	10,71	6,28	3,94	19,86	13,73	7,54	10,09
25 th percentile	13,04	12,78	16,47	12,94	17,23	14,71	11,4	13,99	10,92	4,41	21,49	16,53	9,94	14,47
Median	13,53	15,93	17,96	17,14	22,35	19,06	18,31	15,13	13,69	6,25	23,16	17,46	17,09	18,2
75 th percentile	16,32	18,36	27,37	25,25	28,63	24,44	33,99	24,72	16,5	8,12	24,46	20,95	26,63	25,88
upper whisker	18,59	22,73	42,82	28,01	32,36	27,62	40,57	37,94	19,36	13,66	25,5	23,51	34,18	37,28
Mean	9,68	10,28	15,27	13,19	14,04	14,04	13,27	10,98	8,39	4,44	13,98	10,01	13,75	13,05

II. Anlage: Zahlentafeln Querschnittmessreihe Schlagversuche

Tabelle II.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.17a, S. 132

statistische Angaben Querschnittmessreihe $v_{ip,d}$ in mm/mm·100 % Durchbiegung bei Trägheitsmaximum bezogen auf die Probenlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	2,9E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,5E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04	2,5E-04	2,2E-04	2,4E-04	2,1E-04	2,5E-04	2,3E-04
25 th percentile	2,9E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,5E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,6E-04	2,4E-04	2,5E-04	2,5E-04	2,4E-04	2,1E-04	2,5E-04	2,3E-04
Median	2,9E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,6E-04	2,4E-04	2,7E-04	2,5E-04	2,6E-04	2,1E-04	2,5E-04	2,3E-04
75 th percentile	2,9E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,8E-04	2,4E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,6E-04	2,3E-04	2,5E-04	2,3E-04
upper whisker	2,9E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,9E-04	2,4E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,8E-04	2,4E-04	2,5E-04	2,3E-04
Mean	2,8E-04	2,7E-04	2,6E-04	2,6E-04	2,9E-04	2,5E-04	2,6E-04	2,4E-04	2,6E-04	2,5E-04	2,6E-04	2,2E-04	2,5E-04	2,3E-04

Tabelle II.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.17b, S. 132

statistische Angaben Querschnittmessreihe $f_{ip,d}$ in N/mm ² Kraft bei Trägheitsmaximum bezogen auf die Querschnittfläche														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	2,11	3,29	2,63	3,21	2,07	4,26	2,18	3,67	2,58	3,1	3,94	5,58	2,22	3,05
25 th percentile	2,54	3,75	2,84	3,81	2,28	4,4	2,39	3,82	2,61	3,13	3,94	6,32	2,39	3,14
Median	2,85	3,77	3,23	4,46	2,34	4,51	2,53	4,24	2,74	3,29	3,99	6,76	2,64	3,61
75 th percentile	3,05	4,16	3,62	4,68	2,48	4,67	2,75	4,57	2,78	3,92	4,07	7,09	2,88	4,08
upper whisker	3,47	4,65	4,03	4,93	2,6	4,72	3,25	4,83	2,99	4,18	4,14	7,35	3,21	4,55
Mean	2,83	3,89	3,26	4,27	2,34	4,59	2,57	4,19	2,79	3,48	3,95	6,65	2,66	3,66

Tabelle II.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.18a, S. 133

statistische Angaben Querschnittmessreihe $v_{max,d}$ in mm/mm·100 % Durchbiegung bei Maximalkraft bezogen auf die Probenlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	1,63	1,63	1,71	1,44	1,62	1,34	1,71	1,35	1,45	1,39	1,42	1,37	1,55	1,32
25 th percentile	1,69	1,69	1,73	1,44	1,70	1,38	1,74	1,35	1,49	1,45	1,47	1,38	1,61	1,36
Median	1,80	1,75	1,73	1,44	1,73	1,39	1,75	1,35	1,51	1,47	1,73	1,38	1,69	1,39
75 th percentile	2,20	2,25	1,75	1,44	1,80	1,50	1,81	1,37	1,55	1,49	1,75	1,40	1,84	1,46
upper whisker	2,35	2,42	1,75	1,44	1,91	1,50	1,83	1,39	1,55	1,53	1,83	1,42	1,88	1,46
Mean	1,92	1,89	1,73	1,45	1,75	1,47	1,75	1,36	1,57	1,48	1,66	1,39	1,67	1,41

Tabelle II.4: Zahlenangaben zu Abbildung 4.18b, S. 133

statistische Angaben Querschnittmessreihe $f_{max,d}$ in N/mm ² Kraft bei Maximalkraft bezogen auf die Querschnittfläche														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,59	0,19	3,44	5,27	1,83	3,52	3,05	4,92	2,35	2,15	4,37	7,35	1,94	2,83
25 th percentile	0,75	1,29	4,02	5,71	1,89	3,53	3,39	5,15	2,47	2,52	4,42	7,71	3,12	3,32
Median	0,96	2,16	4,71	7,35	2,14	3,7	3,47	5,54	2,85	3	4,64	8,02	3,59	4,61
75 th percentile	1,89	2,88	5,51	7,49	2,31	3,85	3,64	5,85	3,2	3,27	4,93	8,41	4,07	5,21
upper whisker	3,25	3,15	5,63	7,64	2,57	4,01	3,68	5,91	3,95	4,34	5,47	9,08	4,53	5,51
Mean	1,38	2	4,71	6,72	2,13	3,6	3,5	5,48	2,9	3,02	4,73	8,09	3,35	4,35

Tabelle II.5: Zahlenangaben zu Abbildung 4.19, S. 134

statistische Angaben Querschnittmessreihe $w_{ip,d}$, w_{pnd} , $w_{rb,d}$, $w_{B,d}$ in kJ/m ² Arbeit bezogen auf die Querschnittfläche														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	3,73	3,26	3,09	3,32	3,46	3,54	3,65	3,67	2,88	2,88	5,19	5,09	3,46	2,88
25 th percentile	3,94	3,38	3,2	3,38	3,49	3,6	3,81	3,7	2,95	2,93	5,22	5,41	3,65	2,93
Median (a)	4,03	3,56	3,85	4,25	3,51	3,77	3,96	3,78	3,04	3,65	5,3	5,55	3,82	3,25
75 th percentile	4,1	3,66	4,39	4,38	3,71	3,9	4,07	3,87	3,15	4,12	5,38	5,64	3,89	3,56
upper whisker	4,31	4,02	4,48	4,54	3,73	3,96	4,18	4	3,2	4,2	5,5	5,81	4,06	3,66
Mean	4,06	3,55	3,81	3,96	3,56	3,76	3,93	3,79	3,05	3,58	5,31	5,49	3,78	3,23
lower whisker	0,2	-0,02	3,94	2,68	0,49	0,47	3,49	3,03	0,43	0,08	2,23	4,33	3,17	1,93
25 th percentile	0,35	0,43	4,22	2,78	0,68	0,54	4,33	3,26	0,46	0,11	2,98	4,48	3,17	2,42
Median (b)	0,51	0,65	5	3,35	0,87	0,63	4,71	3,41	0,61	0,17	6,28	4,66	4,34	2,82
75 th percentile	0,81	0,78	5,51	3,6	1,12	1,25	5,16	3,66	0,88	0,76	6,93	4,87	4,96	3,1
upper whisker	1,06	0,82	5,77	3,81	1,55	1,25	5,34	3,84	0,88	0,85	7,06	4,87	5,24	3,51
Mean	0,76	0,64	4,92	3,24	0,97	1,08	4,68	3,46	1	0,53	5,4	4,78	3,64	2,98
lower whisker	0,75	0,99	11,26	9,75	6,75	2,29	8,32	7,74	1,16	0,93	17,18	7,77	2,01	6,49
25 th percentile	1,05	1,25	13,99	11,5	8,13	2,67	13,47	8,54	1,43	1	18,38	11,29	2,6	6,89
Median (c)	1,26	1,97	17,6	11,85	10,43	3,58	17,43	9,87	2,45	1,38	22,71	15,62	5,98	10,45
75 th percentile	1,97	2,97	20,6	14,52	12,01	4,98	19,3	11,85	3,28	2,65	30,73	20,01	10,96	12,12
upper whisker	2,99	4,62	24,85	17,87	17,67	5,79	24,79	14,9	3,28	3,3	37,74	25,79	18,59	16,39
Mean	1,66	2,17	17,86	12,75	10,88	3,78	16,41	10,65	3,59	1,81	25,2	15,92	7,81	10,49
lower whisker	5,21	4,53	18,28	16,06	10,97	6,12	17,39	14,64	4,67	3,87	24,83	17,94	8,43	11,81
25 th percentile	5,36	5,44	21,54	17,51	12,53	7,14	21,42	15,45	4,85	4,45	29,97	21,35	9,62	13,11
Median (d)	5,63	6,03	27,01	19,46	14,82	8,34	26,07	17,37	6,85	4,84	34,54	25,38	13,22	17,04
75 th percentile	6,27	6,6	29,16	22,41	17,07	10,3	27,73	19,18	9,01	6,56	38,78	30,49	20,21	20,01
upper whisker	6,27	8,34	35,11	25,57	22,04	10,64	33,43	21,93	10,89	8,34	49,9	36,16	26,45	23,06
Mean	6,38	6,21	26,59	19,91	15,39	8,46	25,02	17,87	7,54	5,35	35,89	26,01	15,19	16,67

Tabelle II.6: Zahlenangaben zu Abbildung 4.20, S. 135

statistische Angaben Querschnittmessreihe $\kappa_{b,d}$ in mm/mm·100 % Auf die Probenlänge bezogene Bruchlänge														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	7,65	12,08	13,01	14,41	7,41	6,73	11,71	9,62	5,35	2,32	15,08	11,51	7,89	7,46
25 th percentile	11,19	13,01	14,87	17,66	13,43	9,51	14,63	15,05	6,51	3,26	15,48	12,7	9,65	12,72
Median	14,17	14,43	18,45	20,91	16,07	11,93	16,9	17,02	9,31	5,7	20,04	13,29	13,38	23,9
75 th percentile	15,8	17,19	25,28	23,7	23,15	18,78	17,98	21,74	14,41	6,28	22,22	14,68	23,68	39,47
upper whisker	16,73	21,38	33,92	25,09	27,78	18,98	18,39	25,25	22,11	10,22	22,62	15,87	28,95	52,19
Mean	13,04	15,58	20,67	20,31	17,94	13,37	16,76	17,65	10,88	5,37	20,63	13,1	16,45	25,7

III. Anlage: Zahlentafel E-Modul

Tabelle III.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.24, S. 140

statistische Angaben Querschnittmessreihe $E_{p,s}$ in N/mm ² E-Modul														
	OSB-03		PLY-BB		PLY-ID		PLY-KQ		PLY-PO		PLY-RP		SWP-3F	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	2311	2007	5696	6416	2306	3570	4399	5290	2833	2847	6530	8171	4416	5205
25 th percentile	2725	2289	5942	6732	2664	3630	4480	6092	3073	2999	7129	8362	4831	5670
Median	2834	2437	6116	6839	2849	3770	4840	6417	3233	3202	7419	8436	5381	5884
75 th percentile	3160	2525	6180	7084	3222	4198	5114	6882	3361	3422	7549	8609	5628	6129
upper whisker	3355	2692	6375	7325	3593	4309	5613	7367	3425	3769	7728	8938	5865	6420
Mean	2879	2490	6071	6890	2905	3892	4871	6423	3190	3233	7312	8443	5390	5826

IV. Anlage: Zahlentafeln Thermische Schädigung mit Reklimatisierung

Tabelle IV.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.30, S. 144

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $\kappa_{b,d}$ in mm/mm·100% auf die Probenlänge bezogene Bruchlänge												
	OSB-03				PLY-BB				SWP-3F			
	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1
lower whisker	7,7	9,8	12,1	7,0	13,0	14,4	14,4	11,6	7,9	13,4	7,5	6,6
25 th percentile	11,2	11,2	13,0	7,4	14,9	16,0	17,7	14,4	9,7	17,8	12,7	11,8
Median	14,2	14,4	14,4	10,5	18,5	17,9	20,9	21,8	13,4	19,4	23,9	22,4
75 th percentile	15,8	20,0	17,2	12,6	25,3	20,9	23,7	27,0	23,7	23,7	39,5	32,9
upper whisker	16,7	22,3	21,4	19,1	33,9	22,3	25,1	34,9	29,0	31,0	52,2	38,2
Mean	13,0	15,6	15,9	11,1	20,7	19,0	19,8	21,8	16,5	21,3	25,6	21,5
	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2
lower whisker	7,7	9,5	12,1	8,8	13,0	9,5	14,4	10,4	7,9	9,7	7,5	8,3
25 th percentile	11,2	10,4	13,0	10,2	14,9	13,7	17,7	18,3	9,7	14,5	12,7	11,0
Median	14,2	12,9	14,4	13,6	18,5	17,9	20,9	22,3	13,4	18,3	23,9	16,4
75 th percentile	15,8	16,0	17,2	14,9	25,3	23,0	23,7	24,4	23,7	25,0	39,5	45,2
upper whisker	16,7	19,5	21,4	19,1	33,9	34,6	25,1	28,5	29,0	32,5	52,2	54,1
Mean	13,0	13,8	15,9	13,4	20,7	19,4	19,8	24,1	16,5	19,8	25,6	25,0

Tabelle IV.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.31, S. 145

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $f_{max,d}$ in N/mm ² auf die Querschnittfläche bezogene Bruchkraft												
	OSB-03		OSB-03-r1		PLY-BB		PLY-BB-r1		SWP-3F		SWP-3F-r1	
	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1
lower whisker	0,59	0,11	0,19	0,24	3,44	4,83	5,27	5,82	1,94	3,29	2,83	1,37
25 th percentile	0,75	0,15	1,29	1,32	4,02	5,27	5,71	5,82	3,12	3,43	3,32	2,86
Median	0,96	0,47	2,16	2,28	4,71	5,56	7,35	6,79	3,59	3,75	4,61	3,64
75 th percentile	1,89	0,71	2,88	2,62	5,51	5,85	7,49	6,96	4,07	3,84	5,21	3,94
upper whisker	3,25	1,45	3,15	3,41	5,63	5,93	7,64	7,92	4,53	4,10	5,51	4,14
Mean	1,38	0,69	1,78	2,02	4,71	5,42	6,67	6,22	3,35	3,49	4,46	3,31
	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2
lower whisker	0,59	0,15	0,19	0,19	3,44	5,31	5,27	7,38	1,94	2,07	2,83	2,88
25 th percentile	0,75	0,22	1,29	0,26	4,02	5,41	5,71	7,58	3,12	2,53	3,32	3,90
Median	0,96	0,47	2,16	1,14	4,71	5,65	7,35	7,85	3,59	2,78	4,61	4,38
75 th percentile	1,89	0,86	2,88	2,21	5,51	5,88	7,49	8,10	4,07	3,47	5,21	5,21
upper whisker	3,25	0,90	3,15	2,83	5,63	6,03	7,64	8,29	4,53	4,23	5,51	5,56
Mean	1,38	0,50	1,78	1,32	4,71	5,36	6,67	7,85	3,35	2,96	4,46	4,36

Tabelle IV.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.32, S. 146

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $w_{B,d}$ in kJ/m ² auf die Querschnittfläche bezogene Brucharbeit												
	OSB-03		OSB-03-r1		PLY-BB		PLY-BB-r1		SWP-3F		SWP-3F-r1	
	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1	DPU	DPU-r1	DSU	DSU-r1
lower whisker	5,21	4,53	4,53	4,55	18,28	25,56	16,06	15,89	8,43	14,02	11,81	3,23
25 th percentile	5,36	4,60	5,44	5,26	21,54	27,32	17,51	15,89	9,62	14,14	13,11	6,41
Median	5,63	5,21	6,03	5,98	27,01	28,93	19,46	18,06	13,22	16,64	17,04	12,23
75 th percentile	6,27	5,48	6,60	6,64	29,16	31,71	22,41	18,89	20,21	19,26	20,01	13,05
upper whisker	6,27	5,48	8,34	7,31	35,11	36,42	25,57	19,90	26,45	23,31	23,06	13,84
Mean	6,38	5,35	5,99	5,97	26,59	29,67	21,20	16,43	15,19	16,14	16,81	10,20
	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2	DPU	DPU-r2	DSU	DSU-r2
lower whisker	5,21	4,45	4,53	2,68	18,28	23,34	16,06	17,37	8,43	9,39	11,81	5,38
25 th percentile	5,36	4,61	5,44	4,22	21,54	27,63	17,51	18,50	9,62	12,20	13,11	8,71
Median	5,63	4,99	6,03	4,71	27,01	30,21	19,46	19,55	13,22	17,06	17,04	11,24
75 th percentile	6,27	5,22	6,60	5,53	29,16	32,02	22,41	20,29	20,21	18,88	20,01	21,68
upper whisker	6,27	5,64	8,34	6,92	35,11	34,18	25,57	21,73	26,45	21,05	23,06	24,34
Mean	6,38	4,98	5,99	4,90	26,59	28,23	21,20	19,54	15,19	15,83	16,81	13,53

V. Zahlentafeln Trocken ohne Reklimatisierung

Tabelle V.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.33, S. 147

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $\kappa_{b,d}$ in mm/mm·100 % auf die Probenlänge bezogene Bruchlänge												
	OSB-03		OSB-03-r3		PLY-BB		PLY-BB-r3		SWP-3F		SWP-3F-r3	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	7,65	12,08	12,08	12,13	13,01	8,58	14,41	21,38	7,89	15,35	7,46	14,91
25 th percentile	11,19	12,76	13,01	12,5	14,87	13,01	17,66	23,7	9,65	23,25	12,72	20,61
Median	14,17	16,26	14,43	14,53	18,45	20,91	20,91	27,42	13,38	24,56	23,9	35,96
75 th percentile	15,8	17,19	17,19	19,05	25,28	26,49	23,7	33,92	23,68	31,58	39,47	42,54
upper whisker	16,73	19,32	21,38	20,52	33,92	44,14	25,09	39,96	28,95	32,02	52,19	54,82
Mean	13,04	17,94	15,9	15,63	20,67	22,76	19,84	28,72	16,45	28,04	25,57	33,07

Tabelle V.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.34, S. 147

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $f_{max,d}$ in N/mm ² Kraft bei Maximalkraft bezogen auf die Querschnittfläche												
	OSB-03		OSB-03-r3		PLY-BB		PLY-BB-r3		SWP-3F		SWP-3F-r3	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	0,59	0,09	0,19	0,99	3,44	5,09	5,27	7,11	1,94	1,47	2,83	2,62
25 th percentile	0,75	0,13	1,29	1,61	4,02	5,21	5,71	7,38	3,12	1,63	3,32	3,67
Median	0,96	0,83	2,16	2,07	4,71	5,26	7,35	7,84	3,59	1,89	4,61	3,97
75 th percentile	1,89	1,12	2,88	3,03	5,51	5,73	7,49	8,04	4,07	2,1	5,21	4,54
upper whisker	3,25	1,93	3,15	3,78	5,63	5,92	7,64	8,45	4,53	2,52	5,51	5,4
Mean	1,38	0,78	1,78	2,29	4,71	5,42	6,67	7,77	3,35	1,95	4,46	4,08

Tabelle V.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.35, S. 148

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $w_{B,d}$ in kJ/m ² auf die Querschnittfläche bezogene Brucharbeit												
	OSB-03		OSB-03-r3		PLY-BB		PLY-BB-r3		SWP-3F		SWP-3F-r3	
	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU	DPU	DSU
lower whisker	5,21	3,58	4,53	5,08	18,28	23,04	16,06	21,65	8,43	9,82	11,81	8,45
25 th percentile	5,36	4,4	5,44	6,11	21,54	24,17	17,51	22,53	9,62	12,01	13,11	11,2
Median	5,63	4,85	6,03	6,57	27,01	29,58	19,46	24,02	13,22	14,25	17,04	13,98
75 th percentile	6,27	6,01	6,6	7,7	29,16	35,71	22,41	24,93	20,21	14,87	20,01	19,37
upper whisker	6,27	6,94	8,34	7,96	35,11	41,38	25,57	25,82	26,45	16,94	23,06	21,77
Mean	6,38	5,03	5,99	6,69	26,59	30,34	21,2	23,81	15,19	13,62	16,81	14,85

VI. Anlage: Zahlentafeln Kerbwirkung im Normklima

Tabelle VI.1: Zahlenangaben zu Abbildung 4.36, S. 148

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $\kappa_{b,d}$ in mm/mm·100% auf die Probenlänge bezogene Bruchlänge												
	OSB-03				PLY-BB				SWP-3F			
	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK
lower whisker	7,7	8,4	12,1	5,1	13,0	12,1	14,4	11,2	7,9	2,2	7,5	5,3
25 th percentile	11,2	8,8	13,0	7,0	14,9	12,1	17,7	16,3	9,7	6,1	12,7	7,5
Median	14,2	9,1	14,4	7,4	18,5	13,2	20,9	19,5	13,4	10,8	23,9	9,4
75 th percentile	15,8	9,8	17,2	9,3	25,3	17,7	23,7	23,7	23,7	19,7	39,5	11,0
upper whisker	16,7	10,2	21,4	11,2	33,9	19,1	25,1	24,6	29,0	20,6	52,2	14,0
Mean	13,0	9,3	15,9	7,9	20,7	14,5	19,8	21,3	16,5	14,5	25,6	9,3

Tabelle VI.2: Zahlenangaben zu Abbildung 4.37, S. 149

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $f_{max,d}$ in N/mm ² auf die Querschnittfläche bezogene Bruchkraft												
	OSB-03				PLY-BB				SWP-3F			
	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK
lower whisker	0,59	0,22	0,19	0,18	3,44	4,75	5,27	6,19	1,94	0,56	2,83	3,13
25 th percentile	0,75	0,25	1,29	0,25	4,02	5,30	5,71	6,19	3,12	0,75	3,32	3,39
Median	0,96	0,27	2,16	0,26	4,71	5,68	7,35	6,51	3,59	0,94	4,61	4,11
75 th percentile	1,89	0,30	2,88	0,32	5,51	6,03	7,49	6,61	4,07	1,02	5,21	4,81
upper whisker	3,25	0,30	3,15	0,34	5,63	6,49	7,64	6,79	4,53	1,06	5,51	5,47
Mean	1,38	0,31	1,78	0,29	4,71	5,51	6,67	6,26	3,35	0,93	4,46	4,17

Tabelle VI.3: Zahlenangaben zu Abbildung 4.39, S. 151

statistische Angaben Längsschnittmessreihe $w_{B,d}$ in kJ/m ² auf die Querschnittfläche bezogene Brucharbeit												
	OSB-03				PLY-BB				SWP-3F			
	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK	DPU	DPK	DSU	DSK
lower whisker	5,21	4,17	4,53	4,73	18,28	28,29	16,06	15,37	8,43	2,79	11,81	9,27
25 th percentile	5,36	4,44	5,44	5,82	21,54	30,61	17,51	16,60	9,62	6,86	13,11	10,23
Median	5,63	5,52	6,03	6,76	27,01	31,78	19,46	17,14	13,22	8,22	17,04	13,68
75 th percentile	6,27	6,30	6,60	6,93	29,16	33,72	22,41	18,15	20,21	10,17	20,01	25,32
upper whisker	6,27	6,48	8,34	7,59	35,11	34,22	25,57	18,42	26,45	13,18	23,06	26,87
Mean	6,38	5,38	5,99	6,40	26,59	30,39	21,20	17,38	15,19	8,35	16,81	16,15

Christoph Müller
Turnhallenweg 9
08527 Plauen

Lebenslauf

Persönliche Daten

Familienstand: ledig

Geburtsdatum / Ort: 15.12.1982 in Plauen

Wissenschaftliche Tätigkeit

seit 07.2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Fördertechnik an der Fakultät für Maschinenbau der TU Chemnitz

Studium

2003 - 2009 Studium Maschinenbau / Produktionstechnik an der TU Chemnitz

Abschluss: Dipl.-Ing. Maschinenbau

Wehrersatzdienst

2002 - 2003 beim Stadtwegemeister der Stadt Plauen

Schulbildung

1999 - 2002 Technisches Gymnasium am beruflichen Schulzentrum e.o.plauen

1989 - 1999 Grund- und Mittelschule Neundorf